



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS PENGARUH KARAKTERISTIK HISTERESIS INTI
TRANSFORMATOR TERHADAP GANGGUAN
FERORESONANSI**

Reno Hidayat
NRP 07111440000008

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS IMPACT OF TRANSFORMER CORE
HYSTERESIS CHARACTERISTIC ON FERRORESONANCE**

Reno Hidayat
NRP 07111440000008

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

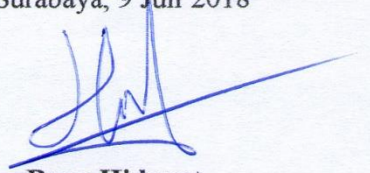
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul "**Analisis Pengaruh Karakteristik Histerisis Inti Transformator Terhadap Gangguan Feroresonansi**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 9 Juli 2018



Reno Hidayat

NRP. 07111440000008

**ANALISIS PENGARUH KARAKTERISTIK
HISTERISIS INTI TRANSFORMATOR TERHADAP
GANGGUAN FERORESONANSI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 19700712 199802 1001

IGN Satriyadi H., ST., MT.
NIP. 19730123 200212 1001



ANALISIS PENGARUH KARAKTERISTIK HISTERISIS INTI TRANSFORMATOR TERHADAP GANGGUAN FERORESONANSI

Nama : Reno Hidayat
NRP : 07111440000008
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRAK

Inti besi dari transformator merupakan komponen induktansi nonlinier. Ketika komponen ini memenuhi beberapa kondisi, maka fenomena feroresonansi dapat terjadi. Feroresonansi dapat menyebabkan gangguan tegangan lebih dan arus lebih pada sistem sehingga berpotensi merusak transformator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui efek dari perbedaan inti transformator terhadap gangguan feroresonansi. Pada tugas akhir ini, transformator tiga fasa dengan tipe inti yang berbeda disimulasikan pada perangkat lunak ATPDraw. Variabel yang disimulasikan berupa *shunt capacitance* dan *grading capacitance* dengan *trigger* berupa *switching* tiga fasa serentak. Hasil respon tegangan pada simulasi diolah pada perangkat lunak MATLAB untuk didapatkan diagram bifurkasinya untuk mengetahui kestabilan sistem. Hasil dari tugas akhir ini didapatkan bahwa perbedaan inti transformator mempengaruhi respon gangguan feroresonansinya. Tipe inti M5 dengan *core losses* yang besar dan *minimum inductance* yang kecil memiliki respon gangguan feroresonansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan inti tipe M0H dan ZDKH yang memiliki *core losses* lebih kecil dan *minimum inductance* yang lebih besar.

Kata kunci: ATPDraw, diagram bifurkasi, feroresonansi, inti transformator, transformator tiga fasa

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS IMPACT OF TRANSFORMER CORE HYSTERESIS CHARACTERISTIC ON FERRORESONANCE

Nama : Reno Hidayat
NRP : 07111440000008
Advisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Advisor II : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRACT

Iron core of a transformer is a nonlinear inductance component. When this component met certain conditions, ferroresonance phenomenon may occur. This phenomenon may distort the system into over voltage and over current conditions which may lead to destroying the transformer. In this study, three types of iron core had been simulated using ATPDraw to find out the ferroresonance responses. MATLAB also had been used to plot the bifurcation diagram of simulation results. From this diagram, the stability of system could be figured out. From this study, Iron core type M5 had better characteristic of ferroresonance responses other than M0H and ZDKH despite having smaller minimum inductance and larger iron core lesses than M0H and ZDKH type.

Keywords: ATPDraw, bifurcation diagram, ferroresonance, iron core of transformer, three phase transformer

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

ANALISIS PENGARUH KARAKTERISTIK HISTERESIS INTI TRANSFORMATOR TERHADAP GANGGUAN FERORESONANSI

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Ibu, bapak, dan kakak-kakak saya atas doa dan dukungannya dalam mendampingi saya hingga menjadi seorang sarjana.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc dan I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng. selaku Ketua Departemen serta seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
5. Luthfi Lukman Hakim, Kadek Suparta Anugrah, Neisya Islamey Rifma, Mas Arief Budi Ksatria, dan Mas Mochammad Wahyudi yang senantiasa membantu memberikan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Teman-teman asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
7. Dicky Putra Aditya, Verdiansyah, Mirza Farhan Prasetyo, Bagus Aries Saputra, dan Julian Moslem selaku teman teman kos kupat yang telah banyak membantu menghibur dikala sedang pusing TA

8. Primadiana ARA, Herdian Deni Prayoga, Juan Siva, Wilda Gitanova, Christy Febrina yang telah rela menjadi sahabat penulis sejak dari SMP.
9. Seluruh keluarga besar e-54 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di jurusan teknik elektro.
10. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, 9 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II SISTEM TRANSMISI, TRANSFORMATOR, FERORESONANSI, DAN BIFURKASI.....	5
2.1 Sistem Transmisi.....	5
2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik.....	5
2.1.2 Klasifikasi Sistem Transmisi.....	5
2.2 Transformator.....	6
2.2.1 Pengertian Transformator.....	6
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator.....	6
2.2.3 Kurva Magnetisasi Transformator	7
2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator.....	8
2.2.5 Pengujian Transformator.....	9
2.3 Feroresonansi	11
2.3.1 Pengertian Resonansi	11
2.3.2 Pengertian Feroresonansi	12
2.3.3 Perbedaan Resonansi dengan Feroresonansi	13
2.3.4 Klasifikasi Feroresonansi	13
2.4 Bifurkasi.....	15
2.4.1 Pengertian Bifurkasi.....	15
2.4.2 Analisa Feroresonansi Menggunakan Diagram Bifurkasi....	16
BAB III SKEMA PEMODELAN FERORESONANSI DAN METODE BIFURKASI.....	19
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi.....	19
3.2 Pengambilan Data	23
3.3 Pengolahan Data	23

BAB IV	ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DENGAN INTI BERBEDA	25
4.1	Kondisi Normal	25
4.2	Kondisi Feroresonansi Akibat <i>Switching</i>	26
4.2.1	Feroresonansi Akibat Variasi <i>Grading Capacitance</i> (C_g)....	27
4.2.1.1	Respon Tegangan Tiga Fasa	27
4.2.1.2	Perbandingan Respon Tegangan Satu Fasa Inti Transformator M5, M0H, dan ZDKH.....	35
4.2.1.3	Diagram Bifurkasi Hasil Simulasi	40
4.2.2	Feroresonansi Akibat Variasi <i>Shunt Capacitance</i> (C_s).....	47
4.2.2.1	Respon Tegangan Tiga Fasa	47
4.2.2.2	Perbandingan Respon Tegangan Satu Fasa Inti Transformator M5, M0H, dan ZDKH.....	55
4.2.2.3	Diagram Bifurkasi Hasil Simulasi	60
BAB V	PENUTUP	67
5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	68
	DAFTAR PUSTAKA.....	69
	LAMPIRAN	71
	RIWAYAT HIDUP.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	One line diagram sistem tenaga listrik sederhana	5
Gambar 2.2	Model transformator sederhana	7
Gambar 2.3	Jenis-jenis kurva magnetisasi	8
Gambar 2.4	Rangkaian ekivalen transformator	9
Gambar 2.5	Rangkaian ekivalen transformator (a) Referensi sisi primer (b) Referensi sisi sekunder	9
Gambar 2.6	Skema pengujian hubung terbuka transformator	10
Gambar 2.7	Skema pengujian hubung singkat transformator	11
Gambar 2.8	Resonansi seri (a) Rangkaian resonansi seri (b) Hubungan arus dan frekuensi resonansi	13
Gambar 2.9	Rangkaian Feroresonansi Sederhana Menggunakan ATPDraw	13
Gambar 2.10	Karakteristik feroresonansi mode fundamental [8]	14
Gambar 2.11	Karakteristik feroresonansi mode subharmonik [8]	15
Gambar 2.12	Karakteristik feroresonansi mode quasi-periodik [8]	15
Gambar 2.13	Karakteristik feroresonansi mode chaotik [8]	15
Gambar 2.14	Karakteristik diagram bifurkasi [10]: a) <i>Stray capacitance</i> b) <i>Grading capacitance</i>	16
Gambar 2.15	Langkah-langkah plotting diagram bifurkasi	17
Gambar 3.1	Kurva magnetisasi transformator dengan inti berbeda ...	22
Gambar 3.2	Rangkaian pemodelan feroresonansi transformator tiga fasa	23
Gambar 3.3	<i>Flowchart</i> pengambilan dan pengolahan data	24
Gambar 4.1	Transformator 3 fasa pada saat kondisi normal (a) respon tegangan fasa A (b) respon tegangan fasa B (c) respon tegangan fasa C	26
Gambar 4.2	Respon tegangan pada inti M5 dengan C_g 0,007 μ f (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa	29
Gambar 4.3	Respon tegangan pada inti M0H dengan C_g 0,007 μ f (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa	30
Gambar 4.4	Respon tegangan pada inti ZDKH dengan C_g 0,007 μ f (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan	

	pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa	31
Gambar 4.5	Respon tegangan pada inti M5 dengan Cg 4 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	32
Gambar 4.6	Respon tegangan pada inti M0H dengan Cg 4 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa	33
Gambar 4.7	Respon tegangan pada inti ZDKH dengan Cg 4 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa	34
Gambar 4.8	Respon tegangan dengan Cg 0,005 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	36
Gambar 4.9	Respon tegangan dengan Cg 0,03 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	37
Gambar 4.10	Respon tegangan dengan Cg 0,08 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	38
Gambar 4.11	Respon tegangan dengan Cg 0,3 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	39
Gambar 4.12	Diagram bifurkasi variasi <i>grading capacitance</i> pada inti M5 (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C	41
Gambar 4.13	Diagram bifurkasi variasi <i>grading capacitance</i> pada inti M0H (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	42
Gambar 4.14	Diagram bifurkasi variasi <i>grading capacitance</i> pada inti ZDKH (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	43
Gambar 4.15	Diagram bifurkasi variasi <i>grading capacitance</i> pada inti M5 (a) Mode fundamental (b) Mode subharmonik (c) Mode quasi-periodik (d) Mode chaotic.....	45

Gambar 4.16	Diagram hasil simulasi inti M5, M0H, dan ZDKH dengan variasi C_g	47
Gambar 4.17	Respon tegangan pada inti M5 dengan C_s 0,04 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	49
Gambar 4.18	Respon tegangan pada inti M0H dengan C_s 0,04 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	50
Gambar 4.19	Respon tegangan pada inti ZDKH dengan C_s 0,04 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	51
Gambar 4.20	Respon tegangan pada inti M5 dengan C_s 0,1 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	52
Gambar 4.21	Respon tegangan pada inti M0H dengan C_s 0,1 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	53
Gambar 4.22	Respon tegangan pada inti ZDKH dengan C_s 0,1 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa.....	54
Gambar 4.23	Respon tegangan dengan C_s 0,008 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	56
Gambar 4.24	Respon tegangan dengan C_s 0,04 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	57
Gambar 4.25	Respon tegangan dengan C_s 0,08 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	58

Gambar 4.26	Respon tegangan dengan Cs 0,1 μ f (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.	59
Gambar 4.27	Diagram bifurkasi variasi <i>shunt capacitance</i> pada inti M5 (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C	61
Gambar 4.28	Diagram bifurkasi variasi <i>shunt capacitance</i> pada inti M0H (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	62
Gambar 4.29	Diagram bifurkasi variasi <i>shunt capacitance</i> pada inti ZDKH (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	63
Gambar 4.30	Diagram bifurkasi variasi <i>shunt capacitance</i> pada inti M5 (a) Mode fundamental (b) Mode subharmonik (c) Mode quasi-periodik (d) Mode chaotic.....	65
Gambar 4.31	Diagram hasil simulasi inti M5, M0H,dan ZDKH dengan variasi Cs	66

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi jenis inti transformator yang disimulasikan	21
Tabel 3.2 Hasil pengujian <i>open circuit</i>	21
Tabel 3.3 Parameter kurva magnetisasi pada transformator	21
Tabel 3.4 Parameter rangkaian pemodelan feroresonansi	22
Tabel 4.1 Perbandingan mode feroresonansi pada respon tegangan	46
Tabel 4.2 Perbandingan mode feroresonansi pada respon tegangan	66

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Inti besi dari sebuah transformator merupakan sebuah komponen induktansi nonlinear yang direpresentasikan sebagai kurva histerisis. Pada kurva histerisis terdapat dua area, yaitu daerah kerja transformator dan daerah saturasi. Ketika suatu gangguan transient seperti *switching circuit breaker* atau hubung singkat terjadi, transformator bekerja pada daerah saturasinya. Hal ini dapat memicu terjadinya gangguan feroresonansi.

Meskipun istilah feroresonansi sudah ada sejak tahun 1920 [1], feroresonansi masih menjadi masalah hingga saat ini. Hal ini dikarenakan sinyal gangguan feroresonansi cukup sulit untuk dibedakan dengan sinyal gangguan lainnya. Feroresonansi dapat muncul pada sistem tenaga listrik yang memiliki komponen induktansi nonlinear, kapasitansi, sumber tegangan AC, serta dipicu oleh beberapa kondisi berupa switching kontak, gangguan petir, dan gangguan *short circuit*. Fenomena feroresonansi dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan arus lebih pada sistem tenaga listrik sehingga berpotensi dapat merusak peralatan.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Høidalen et al., sudah membandingkan pemodelan transformator dengan kurva magnetisasi yang berbeda-beda serta efeknya ke respon *open circuit*, fluks sisa, serta arus *inrush*. Akan tetapi mereka belum meneliti mengenai efeknya terhadap fenomena feroresonansi [4]. Sedangkan pada studi [2] dan [3] pendeteksian feroresonansi dengan karakteristik kurva histerisis yang berbeda sudah dilakukan. Akan tetapi rangkaian ekuivalen transformator yang digunakan pada penelitian tersebut merupakan pemodelan 3x1 fasa. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah studi mengenai pengaruh karakteristik kurva histerisis dengan inti yang berbeda terhadap gangguan feroresonansi.

Pada studi ini akan dilakukan simulasi pada transformator tiga fasa buatan Bambang Djaja dengan tipe inti yang berbeda. Perbedaan yang ditekankan pada studi ini yang menjadi perbedaan dengan penelitian sebelumnya adalah parameter inti transformator serta pemodelan rangkaian feroresonansinya. Pada studi ini akan diamati pengaruh respon feroresonansinya ketika pemodelan transformator yang digunakan adalah 1x3 fasa dengan tipe inti yang berbeda-beda.

Permasalahan pada studi ini adalah pengaruh perbedaan karakteristik histerisis inti transformator terhadap gangguan feroresonansi. Batasan masalah pada studi ini adalah transformator yang disimulasikan, yakni transformator 70/6kV 6MVA buatan PT. Bambang Djaja dengan tipe inti M5, M0H, dan ZDKH. Batasan masalah lainnya adalah *trigger* berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada pemodelan rangkaian feroresonansi transformator tiga fasa, variasi *grading capacitance* dan *shunt capacitance*, dan analisa karakteristik feroresonansi pada tegangan sisi primer dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw serta diagram bifurkasi menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Tujuan dan relevansi dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui efek dari perbedaan histerisis inti trafo terhadap feroresonansi ditinjau dari hasil simulasi pemodelan rangkaian. Data tegangan dan waktu dari hasil simulasi akan diolah untuk dilakukan proses pendeteksian feroresonansi. Hasil dari penelitian ini nantinya dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut seperti perancangan desain filter untuk meredam feroresonansi

Metode penelitian dalam studi ini berawal dari pengumpulan referensi mengenai feroresonansi dan karakteristik inti transformator untuk digunakan dalam studi literatur. Kemudian dilakukan pengumpulan data hasil pengujian transformator Bambang Djaja untuk kemudian dilakukan pemodelan dan simulasi rangkaian pada perangkat lunak ATPDraw. Simulasi rangkaian dilakukan dengan beberapa parameter yang berbeda yaitu inti transformator serta nilai *shunt capacitance* dan *grading capacitance*. Hal ini dilakukan untuk melihat karakteristik feroresonansinya pada inti yang berbeda, dengan dilakukan *trigger switching* secara serempak. Kemudian, setelah data selesai diambil akan dilakukan analisis data hasil simulasi. Hasil yang didapat akan digunakan untuk menentukan probabilitas feroresonansi dan karakteristik feroresonansi pada inti yang berbeda. Terakhir adalah penarikan kesimpulan mengenai karakteristik fenomena feroresonansi pada transformator tiga fasa buatan PT. Bambang Djaja dengan inti yang berbeda serta memberikan saran untuk studi selanjutnya.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik khususnya sistem transmisi tenaga listrik, transformator, feroresonansi, dan bifurkasi.

Bab tiga membahas tentang pemodelan rangkaian feroresonansi, metode pengambilan data menggunakan ATPDraw dan metode pengolahan data menggunakan diagram bifurkasi pada MATLAB yang akan digunakan dalam studi ini.

Bab empat berisi hasil simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi berdasarkan parameter gangguan berupa *switching* tiga fasa serempak serta parameter inti transformator, *grading capacitance*, dan *shunt capacitance* menggunakan ATPDraw dan diagram bifurkasi menggunakan MATLAB. Hasil simulasi ini meliputi respon tegangan antar fasa tiap parameter inti transformator, perbandingan respon tegangan antar inti, serta diagram bifurkasi hasil simulasi.

Bab lima berisi kesimpulan dari simulasi dan analisis yang dilakukan melalui sebuah rangkaian pemodelan feroresonansi dan saran untuk penelitian atau studi selanjutnya.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB II

SISTEM TRANSMISI, TRANSFORMATOR, FERORESONANSI, DAN BIFURKASI

2.1 Sistem Transmisi

2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

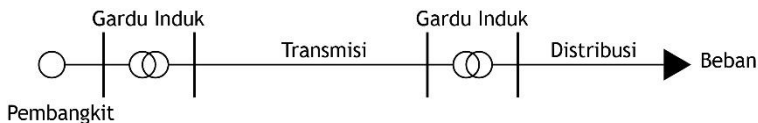
Sistem tenaga listrik adalah sistem penyediaan tenaga listrik yang terdiri dari sistem pembangkit, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Secara umum, sistem pembangkit dan sistem transmisi dikenal sebagai sumber tenaga listrik massal. Sedangkan sistem distribusi adalah saluran terakhir tenaga listrik sebelum sampai ke konsumen [5].

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan saluran penghubung antara sistem pembangkit listrik dengan sistem distribusi. Saluran ini dapat mempertemukan antara pembangkit satu dengan pembangkit lainnya. Gambar 2.1 menunjukkan sebuah sistem tenaga listrik sederhana.

Ketika sistem tenaga listrik beroperasi, pada sistem tenaga listriknya akan terdapat rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya pada sistem transmisi AC tiga fasa dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\Delta P = 3 I^2 R \quad (2.1)$$

Dengan ΔP = Rugi-rugi daya pada transmisi AC tiga fasa (Watt)
 I^2 = Arus pada kawat transmisi (Ampere)
 R = Resistansi kawat transmisi tiap fasa (Ω)



Gambar 2.1 *One line diagram* sistem tenaga listrik sederhana

2.1.2 Klasifikasi Sistem Transmisi

Sistem transmisi dapat diklasifikasikan berdasarkan pemasangannya dan nilai tegangannya. Berdasarkan tempat pemasangannya, sistem transmisi terbagi menjadi tiga, yaitu saluran udara, saluran SF₆, dan saluran bawah tanah. Sedangkan berdasarkan level tegangannya, sistem transmisi dapat dibedakan menjadi menjadi:

- a. Saluran Udara Tegangan Esktra Tinggi (SUTET)

Saluran ini memiliki interval tegangan 200-500 kV. Saluran ini digunakan untuk penyaluran daya dengan kapasitas di atas 500 MW. Saluran ini memiliki tegangan yang sangat tinggi dengan tujuan meminimalisir drop tegangan. Saluran transmisi ini digunakan untuk jarak 100 km sampai dengan 500 km.

b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)

Saluran ini memiliki interval tegangan 30-150 kV. Saluran ini memiliki konfigurasi *single* atau *double circuit*. Pada saluran ini biasanya memiliki dua hingga empat konduktor tiap fasanya yang dihubungkan dengan bundle konduktor. Hal ini dapat membuat saluran menyalurkan daya listrik yang cukup besar. Saluran transmisi ini digunakan untuk jarak kurang dari 100 km.

2.2 Transformator

2.2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah peralatan listrik yang digunakan pada sistem tenaga listrik untuk menyalurkan daya dari pembangkit ke konsumen. Pada sistem tenaga listrik terdapat tegangan transmisi dan distribusi yang beragam. Hal ini menyebabkan transformator daya harus diletakkan pada tiap titik dimana di titik tersebut terjadi transisi antar level tegangan.

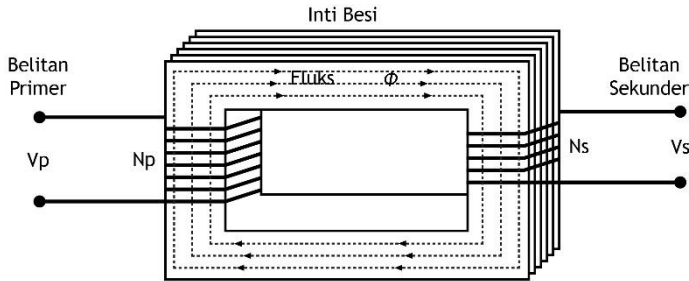
Transformator diklasifikasikan berdasarkan daya keluaran yang mampu dihantarkan pada rating tegangan dan frekuensi tertentu dibawah kondisi operasi normal tanpa melewati batasan temperatur transformator yang telah ditentukan. Temperatur yang diijinkan isolator saat kondisi operasi sangat penting untuk menentukan *output* rating dari transformator (rating kVA). Transformator didisain untuk membatasi temperatur berdasarkan besar beban, termasuk rata-rata kenaikan temperatur dari belitan, dan kenaikan temperatur minyak [6].

Menurut kapasitasnya, transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut (*U.S. rating*) :

1. Transformator daya kecil; 500 – 7500 kVA
2. Transformator daya menengah; 7500 kVA – 100 MVA
3. Transformator daya besar; diatas 100 MVA

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induktansi mutual antara dua buah belitan yang dihubungkan oleh sebuah fluks magnetik. Gambar 2.2 merupakan model transformator sederhana yang terdiri dari belitan primer, inti besi, serta belitan sekunder.



Gambar 2.2 Model transformator sederhana

Jika belitan primer dihubungkan oleh suatu sumber tegangan AC, maka akan muncul fluks magnetic pada kumparan. Fluks ini terhubung dengan inti besi sehingga terhubung dengan belitan sekunder. Pada belitan sekunder akan muncul gaya gerak listrik induksi akibat adanya fluks magnetik dari belitan primer. Prinsip kerja transformator ini sesuai dengan Hukum Faraday. Hukum Faraday menyatakan bahwa pada rangkaian tertutup, nilai gaya gerak listrik induksi sama dengan negatif rate perubahan fluks terhadap waktu [7]. Berdasarkan hukum faraday tersebut didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{\lambda}{N} \quad (2.2)$$

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

dimana:

λ = Total fluks linkage

ϕ = Fluks

$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Webber)

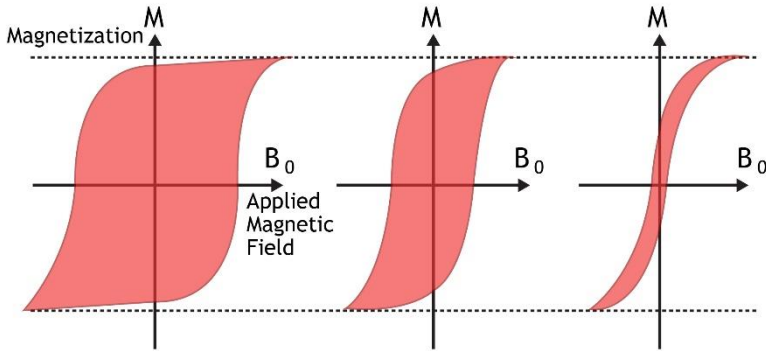
dt = Perubahan waktu (s)

N = Jumlah belitan

e = GGL induksi (Volt)

2.2.3 Kurva Magnetisasi Transformator

Gambar 2.3 menunjukkan jenis jenis kurva magnetisasi. Semakin lebar kurva magnetisasinya, maka kurva akan mempertahankan keadaan saturasinya lebih lama ketika sumber medan dilepas. Hal ini dapat ditemui pada magnet permanen. Ketika kurva magnetisasi cenderung sempit, hal ini akan berakibat pada rugi-rugi inti yang semakin kecil ketika alat sedang beroperasi. Hal ini dapat ditemui pada mesin AC seperti transformator dan motor [7].



Gambar 2.3 Jenis-jenis kurva magnetisasi

2.2.4 Rangkaian Ekvivalen Transformator

Pada transformator terdapat beberapa rugi-rugi yang harus diperhitungkan pada pemodelan transformator [7]. Rugi-rugi tersebut adalah:

- a. Rugi-rugi belitan
Rugi-rugi belitan adalah rugi-rugi panas resistif yang terjadi pada belitan primer dan sekunder dari transformator.
- b. Rugi-rugi arus eddy
Rugi-rugi arus eddy merupakan rugi-rugi panas resistif pada inti transformator.
- c. Rugi-rugi histerisis
Rugi-rugi histerisis berhubungan dengan kurva magnetisasi dari inti.
- d. Rugi-rugi fluks bocor

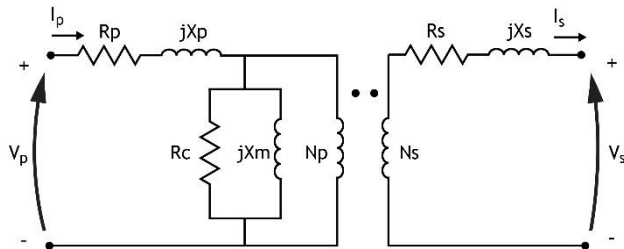
Fluks bocor merupakan ϕ_{LP} dan ϕ_{LS} yang keluar dari inti dan hanya melewati satu belitan transformator. Hal ini dapat mengakibatkan induktansi mutual pada belitan primer dan sekunder.

Seperti yang dijelaskan pada rugi-rugi transformator, pemodelan rangkaian ekvivalen bermula dari pemodelan rugi-rugi transformer. Rugi-rugi belitan dimodelkan sebagai resistansi pada sisi primer R_P dan resistansi pada sisi sekunder R_S . Fluks bocor pada belitan primer ϕ_{LP} dan belitan sekunder ϕ_{LS} dimodelkan dengan induktor pada sisi primer dan sekunder. Efek eksitasi dimodelkan sebagai X_M dan R_C . Pemodelan efek

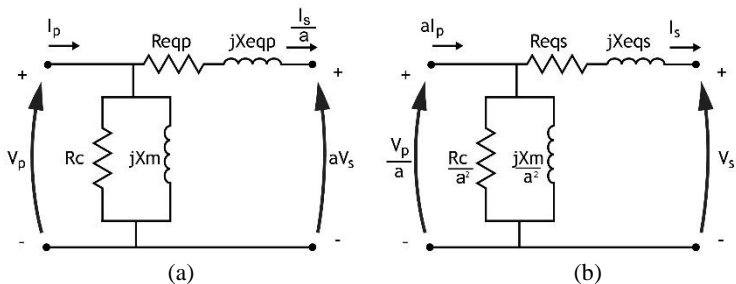
eksitasi diletakkan antara resistansi primer R_p dan induktansi primer L_p . Hal ini dikarenakan tegangan pada inti transformator merupakan tegangan yang disuplai ke transformator. Gambar 2.4 menunjukkan pemodelan akurat dari transformator. Akan tetapi, untuk dapat menganalisa rangkaian secara praktikal, Rangkaian ekivalen dibuat menjadi satu level tegangan saja seperti pada gambar 2.5.

2.2.5 Pengujian Transformator

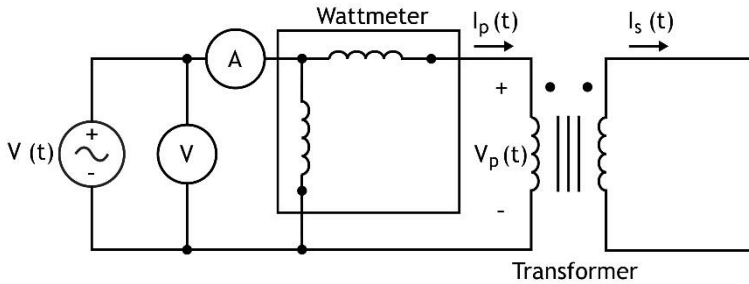
Untuk dapat mengetahui nilai induktansi dan resistansi dari sebuah transformator, pengujian hubung singkat dan pengujian hubung terbuka dapat dilakukan [7]. Pada pengujian hubung terbuka, belitan sekunder transformator tidak dihubungkan dan belitan primernya dihubungkan dengan sumber tegangan. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 2.6. Nilai yang diukur pada saat pengujian adalah tegangan sumber, arus, dan daya. Ketika pengujian dilakukan, semua arus dari sumber akan mengalir ke bagian eksitasi transformator. Nilai R_p dan X_p terlalu kecil jika dibandingkan dengan R_c dan X_m sehingga drop tegangannya tidak terlalu signifikan.



Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen transformator



Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen transformator (a) Referensi sisi primer
(b) Referensi sisi sekunder



Gambar 2.6 Skema pengujian hubung terbuka transformator

Pengujian hubung terbuka ini dilakukan untuk mendapatkan nilai R_c dan X_m . Rumus untuk mendapatkan nilai R_c dan X_m dapat dilihat dari persamaan 2.4 hingga 2.6.

$$|Y_E| = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \quad (2.4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \quad (2.5)$$

$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\theta = \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_M} \quad (2.6)$$

Dimana:

Y_E = Admittansi (Siemens)

I_{OC} = Arus hubung terbuka (A)

V_{OC} = Tegangan hubung terbuka (V)

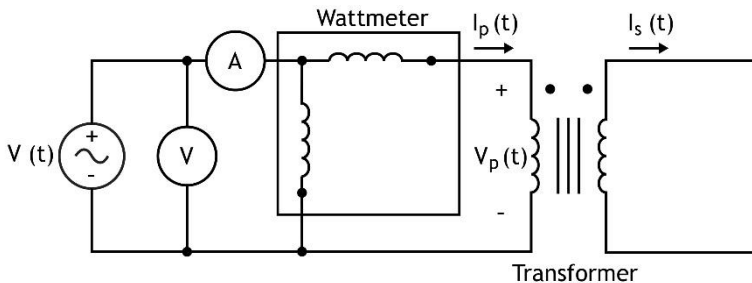
R_C = Resistansi inti (Ohm)

X_M = Reaktansi magnetisasi (Ohm)

Pada pengujian hubung singkat, belitan sekunder dihubungkan singkatkan dan belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 2.7. Tegangan sumber disesuaikan hingga arus pada belitan sekunder mencapai nilai ratingnya. Nilai yang diukur pada saat pengujian adalah tegangan sumber, arus, dan daya. Karena tegangan sumber relatif kecil ketika pengujian, arus eksitasi transformator dapat diabaikan. Karena arus eksitasi diabaikan, tegangan jatuh pada saat pengujian terjadi akibat elemen seri pada transformator. Pengujian hubung singkat transformator digunakan untuk mendapatkan nilai R_{eq} dan X_{eq} .

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (2.7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2.8)$$



Gambar 2.7 Skema pengujian hubung singkat transformator

$$Z_{SE} = \frac{V_{SC} \angle 0^\circ}{I_{SC} \angle -\theta} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle -\theta = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.9)$$

$$R_{eq} = R_P + a^2 R_S \quad (2.10)$$

$$X_{eq} = X_P + a^2 X_S \quad (2.11)$$

Z_{SE} = Impedansi (Ohm)

I_{SC} = Arus hubung singkat (A)

V_{SC} = Tegangan hubung singkat (V)

R_{eq} = Resistansi ekivalen (Ω)

X_{eq} = Reaktansi ekivalen (Ω)

2.3 Feroresonansi

2.3.1 Pengertian Resonansi

Resonansi adalah fenomena yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik di semua level tegangan. Resonansi dapat terjadi pada suatu rangkaian AC yang memiliki komponen kapasitif (C) dan induktif (L). Resonansi terbagi menjadi dua jenis, yaitu resonansi seri dan resonansi parallel. Fenomena resonansi dapat mengakibatkan gejala tegangan lebih atau arus lebih yang dapat menyebabkan kerusakan dielektrik, kegagalan thermal, atau penuaan prematur peralatan [8].

Resonansi seri merupakan rangkaian listrik dengan komponen induktor dan kapasitor yang tersusun seri ketika frekuensi sumber diubah-ubah, maka akan terjadi resonansi dimana nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif.

$$X_C = X_L \quad (2.12)$$

Sehingga syarat untuk terjadinya sebuah resonansi adalah seperti persamaan berikut:

$$\omega_n^2 LC = 1 \quad (2.13)$$

Sehingga ketika resonansi terjadi maka nilai impedansi rangkaian akan berubah dimana dalam persamaan ditulis:

$$Z = R + jX \quad (2.14)$$

Dimana:

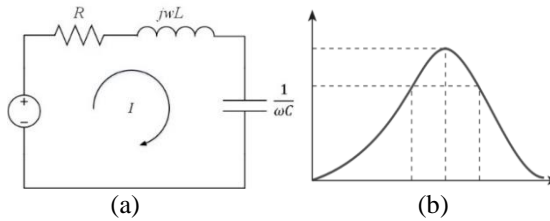
X_C	= Reaktansi Kapasitif (Ω)
X_L	= Reaktansi Induktif (Ω)
L	= induktor (Henry)
C	= kapasitor (Farad)
ω_n	= kecepatan sudut (rad/s)
Z	= Impedansi (Ω)
R	= Resistansi (Ω)
X	= Reaktansi (Ω)

Pada kondisi resonansi, impedansi seri dari kedua elemen berada pada titik minimum dan impedansi parallel berada pada titik maksimum. Sehingga, resonansi seri dapat menyebabkan nilai arus menjadi maksimum. Sedangkan pada resonansi parallel dapat menyebabkan nilai tegangan menjadi maksimum. Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian resonansi seri serta kurva hasil simulasi resonansi.

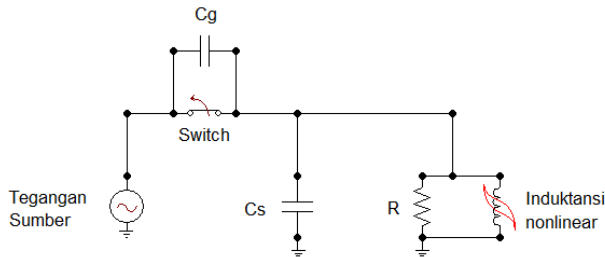
2.3.2 Pengertian Feroresonansi

Feroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena kelistrikan kompleks nonlinear yang dapat mengakibatkan tegangan lebih pada sistem tenaga sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator [9]. Apabila terdapat gangguan pada sistem dan tidak dapat dijelaskan secara spesifik jenis gangguannya, kemungkinan hal tersebut merupakan gejala dari feroresonansi. Gambar 2.9 menunjukkan pemodelan rangkaian feroresonansi pada perangkat lunak ATPDraw.

Istilah feroresonansi mengacu pada fenomena osilasi yang muncul pada sebuah rangkaian listrik yang mengandung elemen induktansi nonlinier, kapasitor dan sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Induktansi nonlinear diperoleh dari penggunaan trafo daya, trafo induktif pengukur tegangan, reaktor shunt pada sistem tenaga listrik. Sedangkan kapasitor diperoleh dari kapasitor bank, kabel, proses switching dan trafo tegangan kapasitif.



Gambar 2.8 Resonansi seri (a) Rangkaian resonansi seri (b) Hubungan arus dan frekuensi resonansi



Gambar 2.9 Rangkaian Feroresonansi Sederhana Menggunakan ATPDraw

2.3.3 Perbedaan Resonansi dengan Feroresonansi

Perbedaan mendasar antara resonansi dengan feroresonansi adalah pada nilai ω . Resonansi membutuhkan elemen kapasitansi dan induktansi, sedangkan feroresonansi membutuhkan elemen kapasitansi dan induktansi non-linear. Feroresonansi dapat terjadi pada range nilai C yang luas, sedangkan pada resonansi nilai kapasitansi terjadi pada suatu nilai tertentu. Pada fenomena feroresonansi, frekuensi sinyal tegangan dan arus dapat berbeda dari frekuensi sinyal sumber, sedangkan pada resonansi frekuensi sinyal tegangan dan arusnya sama dengan sinyal sumber. Pada fenomena feroresonansi respon arus dan tegangan terjadi pada beberapa respon steady state, sedangkan pada resonansi respon tegangan dan arus hanya terjadi pada satu keadaan steady state. [9]

Persamaan untuk mencari frekuensi resonansi adalah sebagai berikut:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

2.3.4 Klasifikasi Feroresonansi

Mode feroresonansi dapat terjadi tergantung pada kondisi awal sistem. Beberapa mode feroresonansi dapat terjadi pada satu rangkaian

sistem yang sama. Mode feroresonansi pada dasarnya diklasifikasikan menjadi empat macam respon steady state, yakni:

a. Mode Fundamental

Sinyal tegangan dan arus pada mode fundamental adalah periodik dengan periode yang sama dengan periode sistem dan memiliki tingkat harmonisa tertentu. Spektrum sinyal pada mode ini tergolong diskontinu yang terdiri dari frekuensi fundamental sistem f_0 , dan frekuensi harmonisnya ($2f_0, 3f_0, \dots$). Gambar 2.10 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode fundamental.

b. Mode Subharmonik

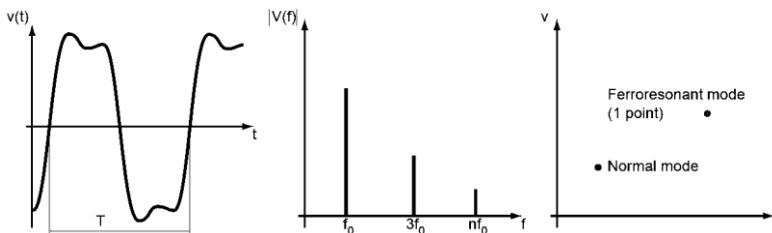
Sinyal tegangan dan arus pada mode fundamental adalah periodik dengan periode nT , dimana merupakan kelipatan dari periode sistem. Spektrum sinyal pada mode ini menunjukkan frekuensi fundamental, f_0/n (f_0 adalah frekuensi sumber dan n adalah bilangan integer), dan disertai tingkat harmonik tertentu. Gambar 2.11 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode fundamental.

c. Mode Quasi-periodik

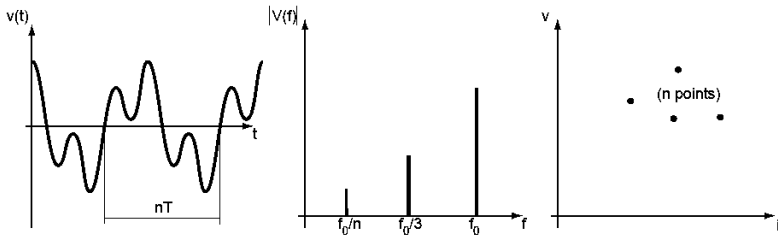
Mode quasi-periodik (pseudo-periodik) adalah mode dengan respon sinyal yang tidak periodik. Spektrum sinyal tergolong diskontinu dengan frekuensi $nf_1 + mf_2$, dimana nilai n dan m adalah bilangan integer dan f_1/f_2 adalah bilangan real irrasional). Gambar 2.12 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode quasi-periodik.

d. Mode Chaotik

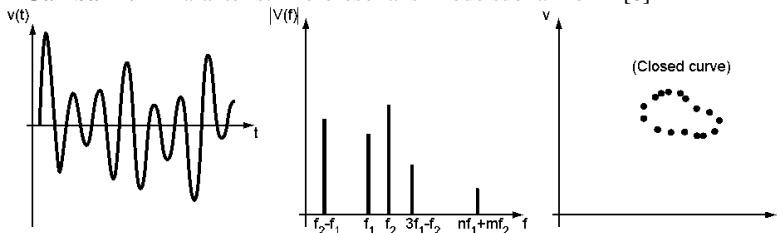
Sinyal tegangan dan arus pada mode chaotik adalah diskontinu dan non-periodik. Respon sinyal yang terbentuk tidak beraturan, tidak dapat diprediksi dan diinterupsi oleh frekuensi apapun. Gambar 2.13 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode chaotik.



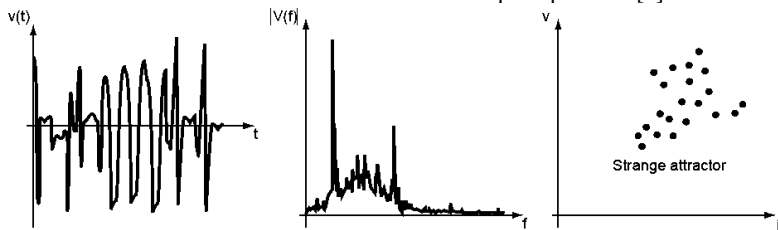
Gambar 2.10 Karakteristik feroresonansi mode fundamental [8]



Gambar 2.11 Karakteristik feroresonansi mode subharmonik [8]



Gambar 2.12 Karakteristik feroresonansi mode quasi-periodik [8]



Gambar 2.13 Karakteristik feroresonansi mode chaotik [8]

2.4 Bifurkasi

2.4.1 Pengertian Bifurkasi

Kondisi stabil dari suatu sistem tenaga listrik sangat bergantung pada parameter tertentu yang besarnya tidak diketahui. Dinamika dari sistem tersebut sangat dipengaruhi oleh perubahan nilai parameternya. Sehingga, jika terdapat perubahan atas nilai parameter tersebut, suatu sistem dapat berubah menjadi tidak stabil. Perubahan kestabilan suatu sistem akibat perubahan suatu nilai parameter dari sistem tersebut disebut sebagai bifurkasi [10].

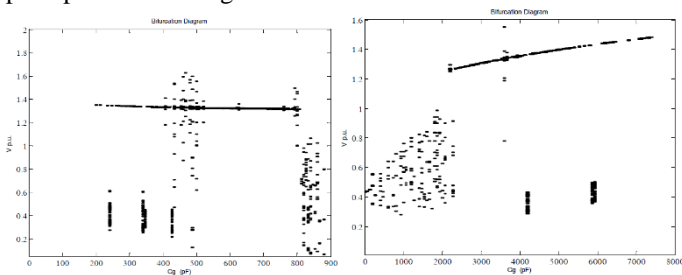
Bifurkasi adalah sebuah perubahan kestabilan suatu sistem akibat perubahan nilai dari suatu parameter sistem. Diagram bifurkasi menampilkan plot yang dapat mengindikasikan perubahan kondisi suatu

sistem dalam suatu rentang nilai parameter tertentu [11]. Metode diagram bifurkasi digunakan untuk analisa gangguan ferroresonansi dalam memahami karakteristik sistem. Selain itu diagram bifurkasi juga digunakan untuk meringkas data yang sangat banyak ke dalam sebuah plot tunggal. Diagram bifurkasi sudah digunakan sebagai metode analisa kasus ferroresonansi pada penelitian-penelitian sebelumnya [10], [11], [12], [12]. Penggunaan diagram bifurkasi dalam analisis ferroresonansi ditunjukkan pada Gambar 2.14.

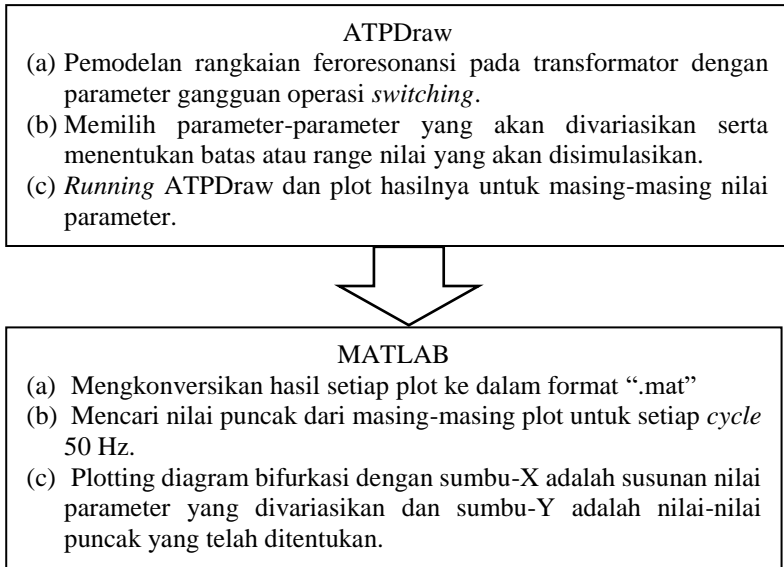
2.4.2 Analisa Ferroresonansi Menggunakan Diagram Bifurkasi

Diagram bifurkasi didapatkan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB. Sebelum sinyal transient diproses pada software ini, rangkaian dianalisa menggunakan parameter tertentu untuk mendapatkan respon plot sinyal pada software ATPDraw. Setelah plot sinyal didapatkan, hasil ini dikonversi kedalam format .mat agar dapat diproses menjadi diagram bifurkasi

Gambar 2.15 menjelaskan langkah-langkah untuk membentuk diagram bifurkasi dua dimensi (2D). Diagram bifurkasi 2D dapat digunakan untuk analisis lebih mendalam mengenai ferroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian.



Gambar 2.14 Karakteristik diagram bifurkasi [10]: a) *Stray capacitance* b) *Grading capacitance*.



Gambar 2.15 Langkah-langkah plotting diagram bifurkasi

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB III

SKEMA PEMODELAN FERORESONANSI DAN METODE BIFURKASI

3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Fenomena feroresonansi pada transformator dengan inti yang berbeda dapat ditunjukkan menggunakan pemodelan rangkaian pada studi ini. Pemodelan rangkaian dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw (*Alternative Transient Program*). Terdapat dua kondisi pada studi ini yaitu keadaan *trigger switching* tiga fasa serempak serta keadaan normal sebagai pembandingan.

Pada rangkaian pemodelan, parameter inti dari transformator merupakan fokus utama pada studi ini. Berdasarkan datasheet trafo yang disimulasikan, inti trafo yang digunakan adalah jenis *grain oriented Hi-B silicon steel, laser or non-laser steel*. Orient core Hi-B adalah sebuah terobosan jenis inti transformator yang memiliki kerapatan fluks magnetik yang tinggi, kerugian inti yang rendah, dan magnetostriction yang lebih rendah dibandingkan inti besi *grain-oriented* jenis konvensional. Jenis ini terbagi lagi berdasarkan tingkat gradenya. Terdapat tiga buah inti transformator yang disimulasikan pada studi ini. Inti tersebut adalah jenis M5, M0H, dan ZDKH.

M5, M0H, dan ZDKH adalah jenis inti buatan Nippon Steel Corporation. Jenis inti ini sudah memenuhi standard JIS (*Japanese Industrial Standard*) C 2552-1986 dan standard AISI (*American Iron and Steel Institute*) 1983. Jenis inti yang disimulasikan memiliki perbedaan pada ketebalan, rugi-rugi inti maksimum pada 1,7T, dan induksi minimum pada 800A/m. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi dari inti trafo yang digunakan.

Dengan menggunakan metode *open circuit test*, didapatkan parameter inti transformator, yaitu nilai resistansi magnetisasi, fluks, dan arus eksitasi. Sedangkan dengan pengujian short circuit test didapatkan parameter resistansi dan induktansi sisi primer dan sekunder transformator. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 3.2.

$$Un(V) = \frac{Un(\%)}{\sqrt{3}} V_{HV} \quad (3.1)$$

$$Iex(A) = Iex(\%) \cdot I_n \quad (3.2)$$

$$S = Un \cdot Iex \quad (3.3)$$

$$P = \frac{P_{NLL}}{3} * 1000 \quad (3.4)$$

$$Q = \sqrt[3]{S^2 - P^2} \quad (3.5)$$

$$I_r = \frac{P}{Un} \quad (3.6)$$

$$I_m = \sqrt{I_{ex}^2 - I_r^2} \quad (3.7)$$

$$R_m = \frac{Un}{I_r} \quad (3.8)$$

$$X_m = \frac{Un}{I_m} \quad (3.9)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \quad (3.10)$$

$$\lambda = I_m L_m \quad (3.11)$$

Dimana:

Un	= Tegangan suplai (V)
I_{ex}	= Arus eksitasi (A)
Q	= Daya Reaktif (VAR)
P	= Daya Aktif (Watt)
S	= Daya Semu (VA)
I_r	= Arus resistif (A)
I_m	= Arus Magnetisasi (A)
R_m	= Resistansi magnetisasi (Ω)
X_m	= Reaktansi magnetisasi (Ω)
L_m	= Induktansi magnetisasi (Henry)
λ	= Fluks (Wb-T)

Berdasarkan data hasil pengujian pada tabel 3.2, Persamaan (3.1) hingga (3.11) digunakan untuk mendapatkan parameter resistansi magnetisasi, arus magnetisasi, serta fluks. Hasil perhitungan untuk mendapatkan parameter tiap inti transformator yang digunakan pada simulasi dapat dilihat pada tabel 3.3. Dari tabel 3.3 dapat dibuat kurva magnetisasi inti transformator yang ditunjukkan pada gambar 3.1. Kurva inilah yang menjadi parameter pada simulasi rangkaian ferroresonansi.

Pada gambar 3.2, pemodelan rangkaian ferroresonansi terdiri dari sumber tegangan tiga fasa yang diketanahkan. Sumber ini terhubung ke *switch* tiga fasa yang diparalel dengan *grading capacitance*. Kemudian *switch* terhubung ke transformator tiga fasa model 70/6 kV 6 MVA *Step-Down Transformers* buatan PT. Bambang Djaja, yang terhubung paralel dengan *shunt capacitance* yang diketanahkan. Parameter rangkaian dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.1 Spesifikasi jenis inti transformator yang disimulasikan

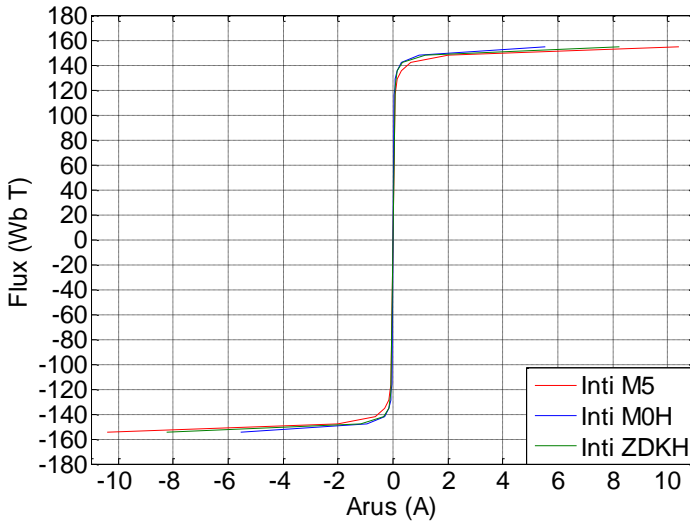
Jenis Inti	Ketebalan (mm)	Rugi-rugi inti maksimum pada 1,7 T (Watt/kg)		Induksi minimum pada 800 A/m (T)
		50 Hz	60 Hz	
M5	0,30	1,39	1,83	1,8
M0H	0,30	1,05	1,39	1,88
ZDKH	0,23	0,9	1,25	1,88

Tabel 3.2 Hasil pengujian *open circuit*

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	I_{ex} (%)
90	5,9290	0,1877
95	6,8160	0,2422
100	7,9020	0,3507
105	9,2750	0,6002
110	11,0880	1,3092
115	13,6460	4,0615
120	17,5930	21,0064

Tabel 3.3 Parameter kurva magnetisasi pada transformator

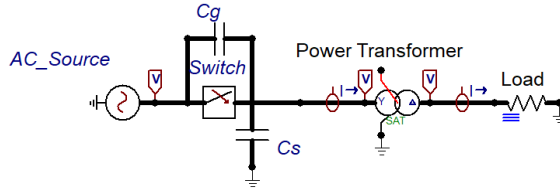
Inti M5		Inti M0H		Inti ZDKH	
I_m (A)	Fluks (Wb-T)	I_m (A)	Fluks (Wb-T)	I_m (A)	Fluks (Wb-T)
0,075491	115,9751	0,047409	115,9751	0,069271	115,9751
0,104418	122,4181	0,060302	122,4181	0,082337	122,4181
0,161089	128,8612	0,086869	128,8612	0,108970	128,8612
0,288321	135,3042	0,145732	135,3042	0,171677	135,3042
0,643332	141,7473	0,305461	141,7473	0,358833	141,7473
2,009947	148,1904	0,936749	148,1904	1,186308	148,1904
10,407075	154,6334	5,546441	154,6334	8,250278	154,6334



Gambar 3.1 Kurva magnetisasi transformator dengan inti berbeda

Tabel 3.4 Parameter rangkaian pemodelan feroresonansi

Parameter	Satuan	Nilai
Sumber Tegangan	kV	70
Frekuensi	Hz	50
Grading Capacitance (C_{g1}, C_{g2}, C_{g3})	μF	0,05
Shunt Capacitance (C_{s1}, C_{s2}, C_{s3})	μF	0,05
Resistansi Magnetisasi Inti M5	Ω	621.567,2206
Resistansi Magnetisasi Inti MOH	Ω	696.387,94516
Resistansi Magnetisasi Inti ZDKH	Ω	916.689,84271
Switching (SW1, SW 2, SW3)	s	0,05
Resistansi primer	Ω	1,275396152
Resistansi sekunder	Ω	0,029027625
Induktansi primer	mH	0,000485622
Induktansi sekunder	mH	0,066098551



Gambar 3.2 Rangkaian pemodelan feroresonansi transformator tiga fasa

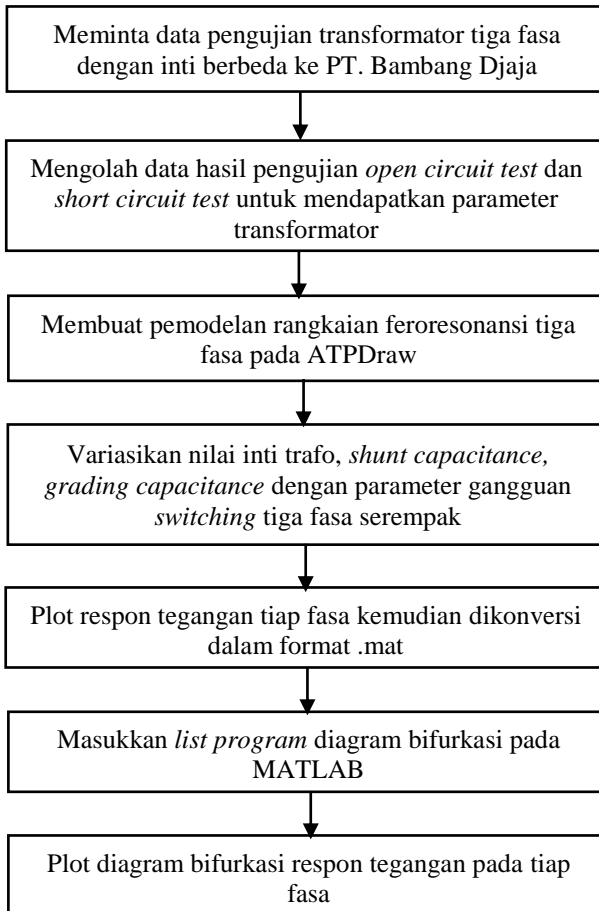
3.2 Pengambilan Data

Pada studi ini, proses pengambilan data dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw. ATPDraw adalah sebuah perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan rangkaian dengan fenomena transien. Terdapat dua kondisi pada studi ini, yaitu saat kondisi normal dan kondisi *trigger switching*. Berdasarkan referensi studi yang sudah ada, variasi nilai kapasitansi dapat memunculkan fenomena feroresonansi [4]. Data yang diambil adalah respon tegangan primer tiap fasa transformator dengan variasi nilai kapasitansi antara 0,001 – 10 μF .

3.3 Pengolahan Data

Proses pengolahan data pada studi ini dilakukan menggunakan bantuan *software* MATLAB. Data hasil respon tegangan sisi primer yang didapatkan dari simulasi ATPDraw dikonversikan menjadi bentuk format MATLAB. Hasil konversi plot tersebut kemudian dimasukkan ke dalam program untuk ditampilkan dalam bentuk diagram bifurkasi.

Diagram bifurkasi digunakan untuk mengetahui persebaran nilai puncak pada sistem yang disimulasikan. Diagram bifurkasi ini memiliki interval yang sudah ditentukan sebelumnya dalam list program dengan adanya perubahan dari salah satu variabel pada sistem. Perubahan variabel ini akan menunjukkan kestabilan sistem dalam bentuk diagram bifurkasi. Teknik diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area yang beresiko *overvoltage* dan area kondisi normal. Pada studi ini, sumbu Y pada diagram bifurkasi menunjukkan nilai tegangan. Sedangkan sumbu X menunjukkan variabel *grading capacitance* atau *shunt capacitance*. Gambar 3.3 menunjukkan alur pengerjaan studi ini.



Gambar 3.3 Flowchart pengambilan dan pengolahan data

BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DENGAN INTI BERBEDA

4.1 Kondisi Normal

Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.2, dapat didapatkan hasil respon tegangan saat kondisi normal. Pada saat kondisi normal, tidak dilakukan *trigger switching* pada rangkaian sehingga tidak terjadi fenomena feroresonansi. Variasi nilai *shunt capacitance* dan *grading capacitance* dapat diabaikan karena belum ada *trigger switching*. Simulasi berlangsung selama 0.5 detik dengan sumber sebesar 70kV. Hasil respon tegangan pada simulasi menampilkan keadaan stabil atau *steady state* dengan perbedaan sudut fasa sebesar 120° untuk setiap fasanya. Hasil dari kondisi normal dapat dijadikan pembandingan terhadap kondisi ketika *trigger switching* dilakukan.

Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ($V_{L-L-rms}$) 70 kV, 50 Hz. Sehingga nilai tegangan *line-netral* (V_{L-Nrms}) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

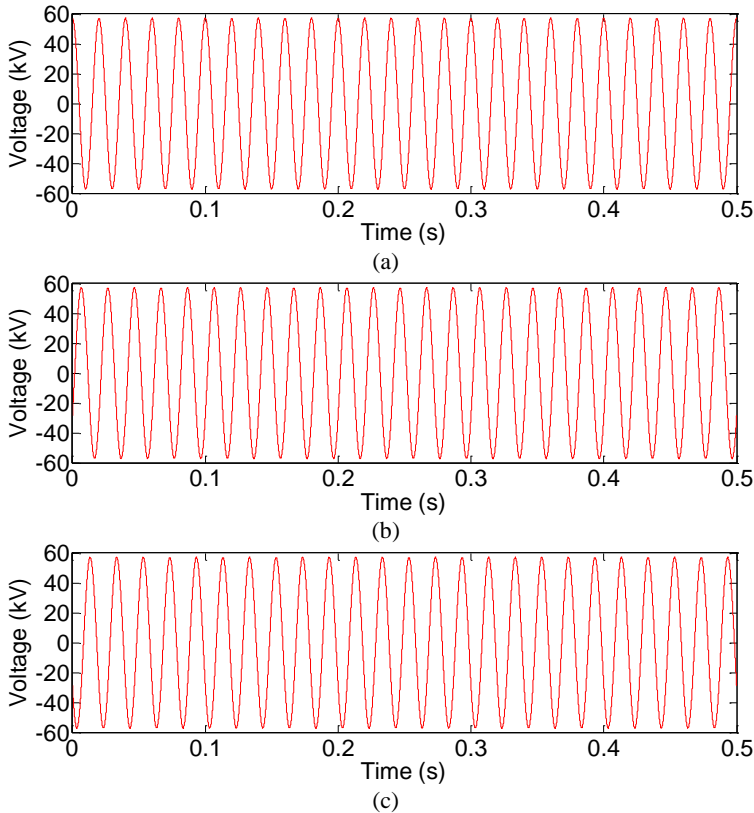
$$V_{L-Nrms} = \frac{70000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 40.414,52 \text{ V}$$

Tegangan puncak *line-netral* ($V_{peakL-netral}$) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_{L-Npeak} = 40414,52 \times \sqrt{2} = 57.154,76 \text{ V}$$

Gambar 4.1 merupakan respon tegangan hasil simulasi rangkaian pada saat kondisi normal pada setiap fasa. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya. Terlihat pada respon tegangan pada kondisi normal masih berbentuk sinusoidal. Tidak terdapat kecacatan dalam bentuk gelombangnya. Hal ini disebabkan karena tidak adanya salah satu pemicu dari feroresonansi yaitu *switching*.



Gambar 4.1 Transformator 3 fasa pada saat kondisi normal (a) respon tegangan fasa A (b) respon tegangan fasa B (c) respon tegangan fasa C

4.2 Kondisi Feroresonansi Akibat *Switching*

Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.2, dapat didapatkan hasil respon tegangan akibat kondisi *switching*. Pada studi ini dilakukan simulasi pemodelan feroresonansi dengan menggunakan *switching* tiga fasa serempak sebagai *trigger* untuk memicu munculnya sinyal feroresonansi. Simulasi berlangsung selama 0,5 detik dengan *trigger switching open* pada detik ke 0,05 detik. Dengan kombinasi nilai kapasitansi yang tepat, trigger *switching* akan memunculkan sinyal feroresonansi dengan berbagai mode pada rangkaian. Sehingga dapat terlihat keadaan abnormal pada rangkaian.

Pada rangkaian simulasi, terdapat dua nilai yang divariasikan, yaitu nilai kapasitansi dan nilai inti trafo. Nilai kapasitansi ini terdiri dari *grading capacitance* (C_g) dan *shunt capacitance* (C_s). Nilai kapasitansi divariasikan dari rentang 0,001 – 10 μF . Pada studi ini akan ditampilkan nilai dari respon tegangan sisi primer.

4.2.1 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* (C_g)

Grading capacitance (C_g) merupakan kapasitansi yang muncul ketika pemutus daya atau *circuit breaker* dibuka. *Grading Capacitance* bersifat seri terhadap rangkaian. Pada studi ini, nilai *grading capacitance* divariasikan antara 0,001 – 10 μF dan nilai *shunt capacitance* konstan pada 0,05 μF . Pada kondisi realnya, nilai C_g dapat berbeda-beda akibat pengoperasian pemutusan *circuit breaker*.

4.2.1.1 Respon Tegangan Tiga Fasa

Gambar 4.2 – 4.7 Menunjukkan plot hasil respon tegangan tiap fasa pada simulasi mengguakan ATPDraw. Gambar 4.2 – 4.4 menunjukkan respon tegangan inti M5, M0H, dan ZDKH ketika *grading capacitance* bernilai kurang dari nilai *shunt capacitance*. Gambar 4.2 menunjukkan respon tegangan pada inti M5 ketika *grading capacitance* bernilai 0,007 μF . Terlihat pada tiap fasanya tidak menunjukkan gangguan feroresonansi. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik ke 0,18 s dan memiliki nilai puncak 7,16 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik ke 0,16 s dan memiliki nilai puncak 7,71 kV. Tegangan fasa C *steady state* setelah detik ke 0,15 s dan memiliki nilai puncak 7,24 kV.

Gambar 4.3 menunjukkan respon tegangan pada inti M0H ketika *grading capacitance* bernilai 0,007 μF . Respon sinyal pada fasa A, B, dan C menunjukkan mode feroresonansi tipe fundamental dengan tegangan puncak dan bentuk respon fundamental yang berbeda-beda. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik ke 0,12 s dan memiliki nilai puncak 35,81 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik ke 0,11 s dan memiliki nilai puncak 23,18 kV. Tegangan fasa C *steady state* setelah detik ke 0,12 s dan memiliki nilai puncak 20,51 kV.

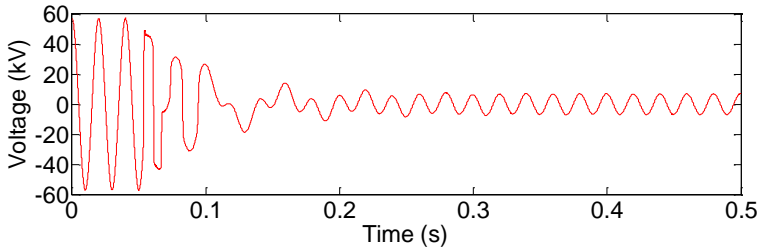
Gambar 4.4 menunjukkan respon tegangan pada inti ZDKH ketika *grading capacitance* bernilai 0,007 μF . Terlihat pada tiap fasanya menunjukkan mode feroresonansi tipe fundamental dengan tegangan puncak dan bentuk respon fundamental yang berbeda-beda. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik ke 0,13 s dan memiliki nilai puncak 22,15 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik ke 0,10 s dan

memiliki nilai puncak 35,12 kV. Tegangan fasa C *steady state* setelah detik ke 0,13 s dan memiliki nilai puncak 24,21 kV.

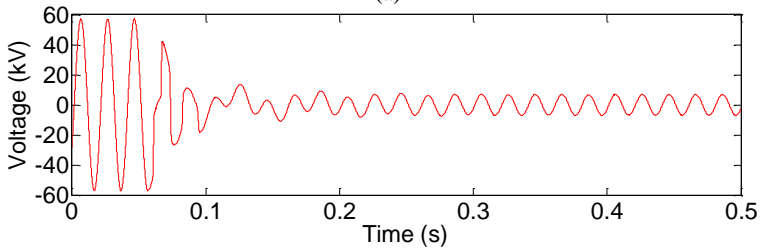
Gambar 4.5 – 4.7 menunjukkan respon tegangan inti M5, M0H, dan ZDKH ketika *grading capacitance* bernilai lebih dari *shunt capacitance*. Gambar 4.5 menunjukkan respon tegangan pada inti M5 ketika *grading capacitance* bernilai 4 μF . Terlihat pada tiap fasanya menunjukkan mode feroresonansi tipe subharmonic dengan bentuk respon sinyal yang relatif sama, dimana terdapat perbedaan pada nilai tegangan puncak dan sudut fasa. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik ke 0,08 s dan memiliki nilai puncak 251,18 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik ke 0,07 s dan memiliki nilai puncak 246,78 kV. Tegangan fasa C *steady state* setelah detik ke 0,08 s dan memiliki nilai puncak 246,41 kV.

Gambar 4.6 menunjukkan respon tegangan pada inti M0H ketika *grading capacitance* bernilai 4 μF . Terlihat pada tiap fasanya menunjukkan mode feroresonansi tipe subharmonic dengan bentuk respon sinyal yang relatif sama, dimana terdapat perbedaan pada nilai tegangan puncak dan sudut fasa. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik ke 0,07 s dan memiliki nilai puncak 434,82 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik ke 0,08 s dan memiliki nilai puncak 417,75 kV. Tegangan fasa C *steady state* setelah detik ke 0,07 s dan memiliki nilai puncak 403,38 kV.

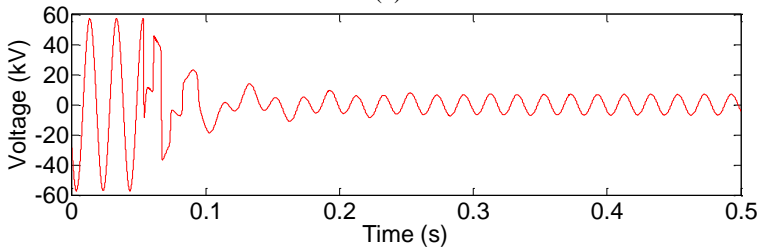
Gambar 4.7 menunjukkan respon tegangan pada inti ZDKH ketika *grading capacitance* bernilai 4 μF . Terlihat pada tiap fasanya menunjukkan mode feroresonansi tipe subharmonic dengan bentuk respon sinyal yang relatif sama, dimana terdapat perbedaan pada nilai tegangan puncak dan sudut fasa. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik ke 0,07 s dan memiliki nilai puncak 291,25 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik ke 0,08 s dan memiliki nilai puncak 280,31 kV. Tegangan fasa C *steady state* setelah detik ke 0,07 s dan memiliki nilai puncak 248,86 kV.



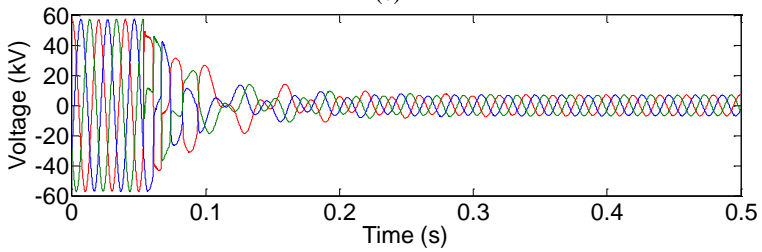
(a)



(b)

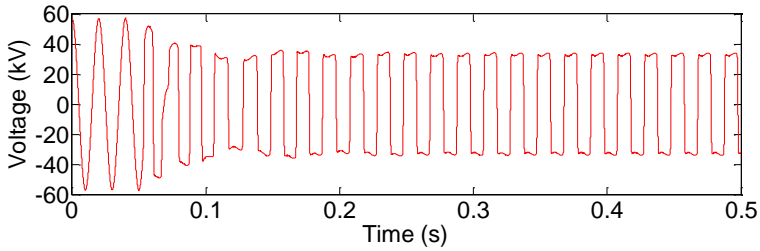


(c)

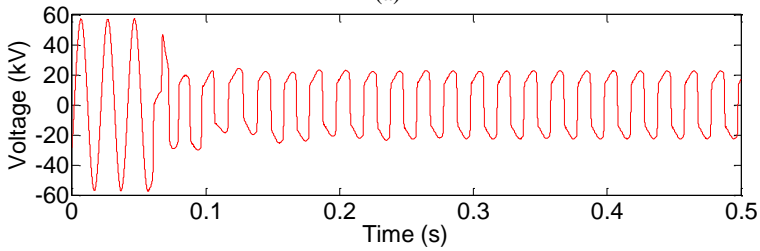


(d)

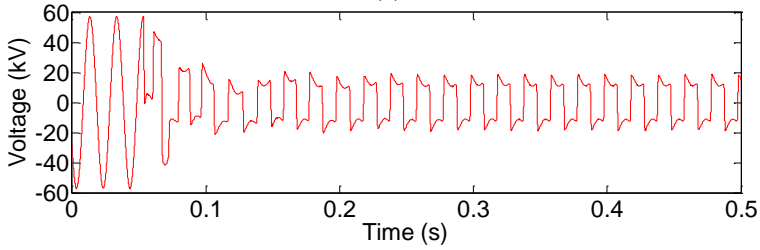
Gambar 4.2 Respon tegangan pada inti M5 dengan C_g 0,007 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



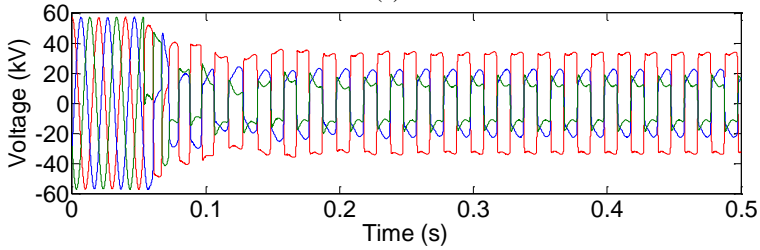
(a)



(b)

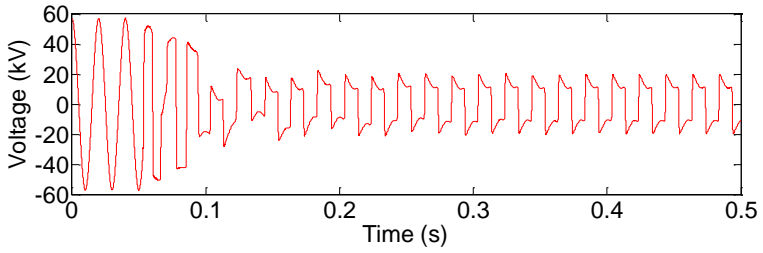


(c)

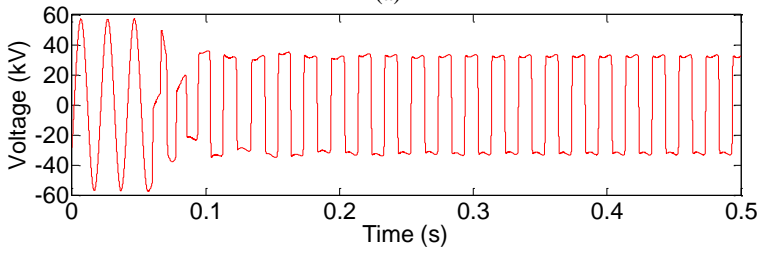


(d)

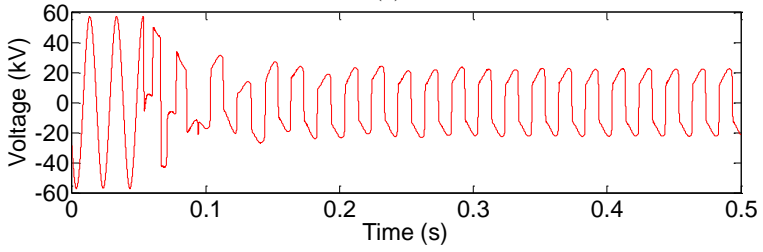
Gambar 4.3 Respon tegangan pada inti M0H dengan C_g $0,007 \mu\text{f}$ (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



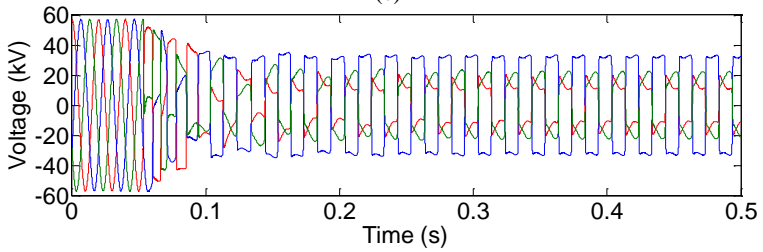
(a)



(b)

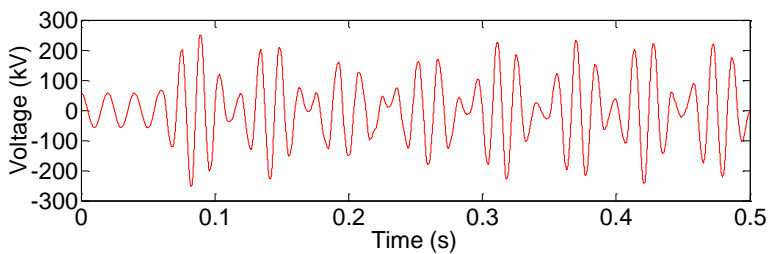


(c)

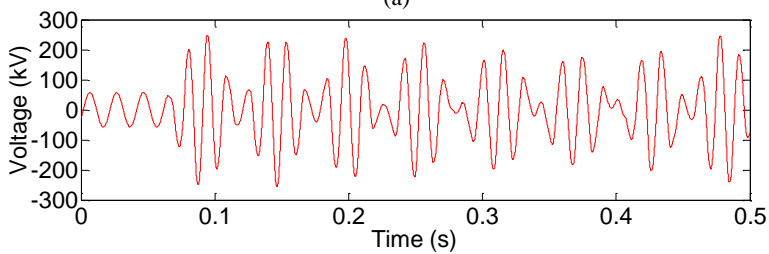


(d)

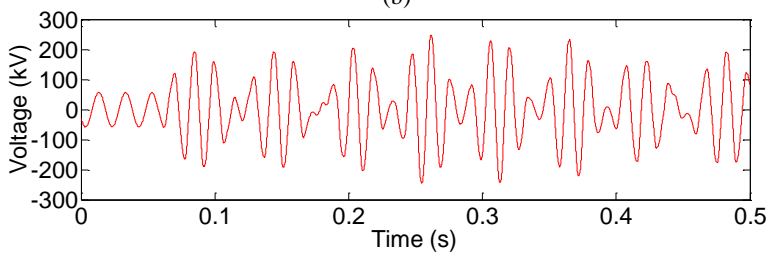
Gambar 4.4 Respon tegangan pada inti ZDKH dengan C_g 0,007 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



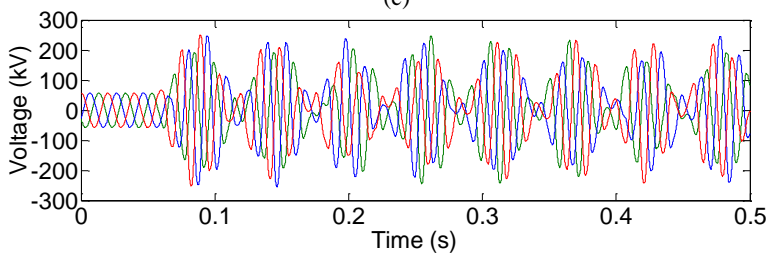
(a)



(b)

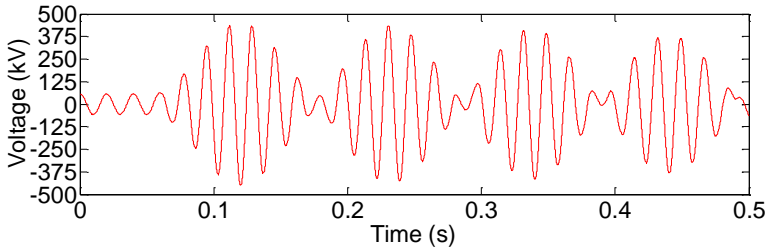


(c)

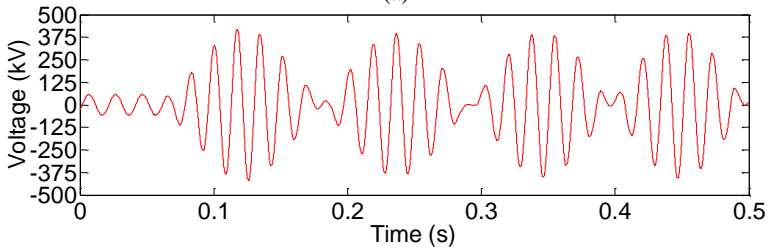


(d)

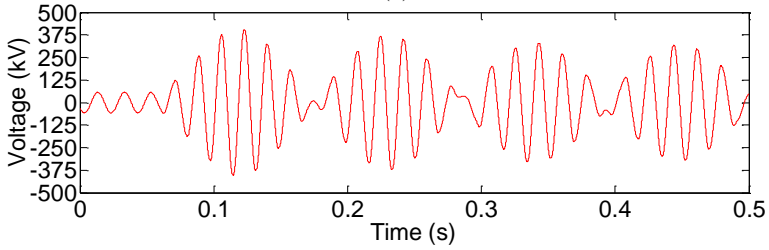
Gambar 4.5 Respon tegangan pada inti M5 dengan C_g 4 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



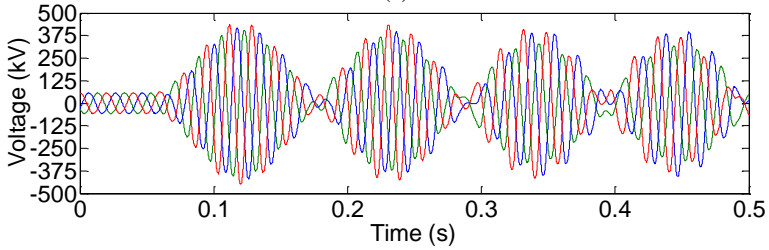
(a)



(b)

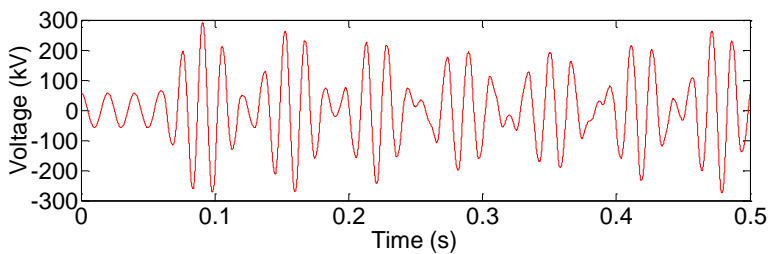


(c)

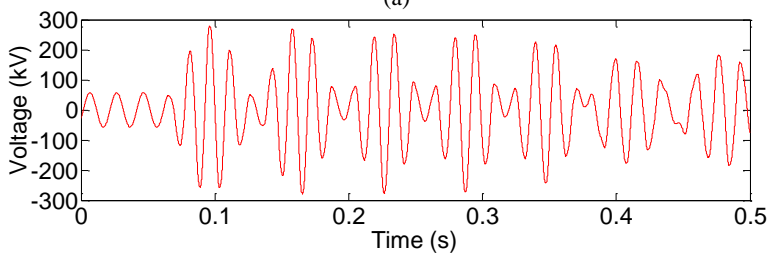


(d)

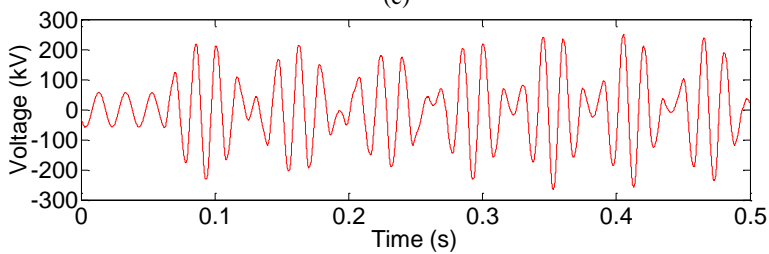
Gambar 4.6 Respon tegangan pada inti M0H dengan C_g 4 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



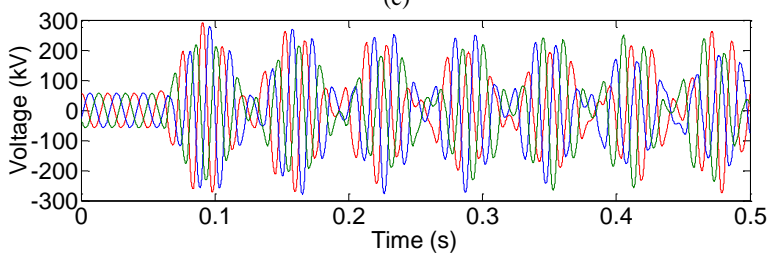
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.7 Respon tegangan pada inti ZDKH dengan C_g 4 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa

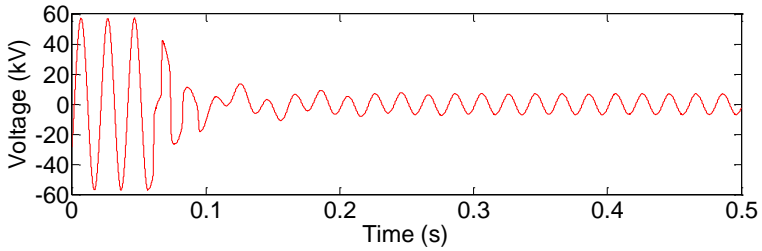
4.2.1.2 Perbandingan Respon Tegangan Satu Fasa Inti Transformator M5, M0H, dan ZDKH

Gambar 4.8 Menunjukkan hasil plot respon tegangan fasa B pada simulasi menggunakan ATPDraw. Ketika *grading capacitance* bernilai 0,005 μF , terlihat perbedaan respon sinyal feroresonansi antara inti ZDKH dengan M0H dan M5. Respon sinyal hasil simulasi terlihat transient setelah terjadi switching pada detik ke 0,05 hingga 0,2 dan beranjak menjadi *steady state*. Respon sinyal feroresonansi pada inti M0H dan ZDKH menunjukkan mode fundamental, sedangkan pada inti M5 tidak terjadi feroresonansi.

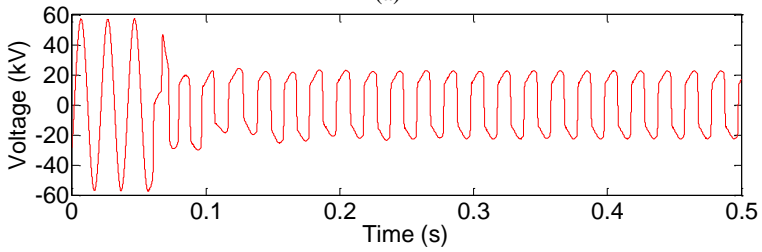
Respon rangkaian mulai terlihat berbeda ketika nilai *grading capacitance* dinaikkan hingga 10 kali lipatnya. Gambar 4.9 adalah respon sinyal feroresonansi saat *grading capacitance* bernilai 0,03 μF . Respon sinyal menunjukkan hasil yang berbeda-beda pada inti trafo yang berbeda. Pada inti M5, sinyal *steady state* pada detik ke 0,11s. Respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonik dengan tegangan puncak 50,21 kV. Pada inti M0H, sinyal terlihat *steady state* pada detik ke 0,21s. Respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonik dengan tegangan puncak 59,58 kV. Pada inti ZDKH, sinyal terlihat *steady state* pada detik ke 0,27s. Respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonik dengan tegangan puncak 58,05 kV.

Gambar 4.10 menunjukkan respon sinyal feroresonansi ketika *grading capacitance* bernilai 0,08 μF . Rangkaian yang disimulasikan menunjukkan respon sinyal yang berbeda pada inti trafo yang berbeda. Pada inti M5, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonik ketika *steady state* pada 0,19s dengan tegangan puncak mencapai 57,89 kV. Pada inti M0H, sinyal feroresonansi menunjukkan mode chaotic dengan tegangan puncak 95,21 kV. Pada inti ZDKH, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode chaotic dengan tegangan puncak 107,58 kV.

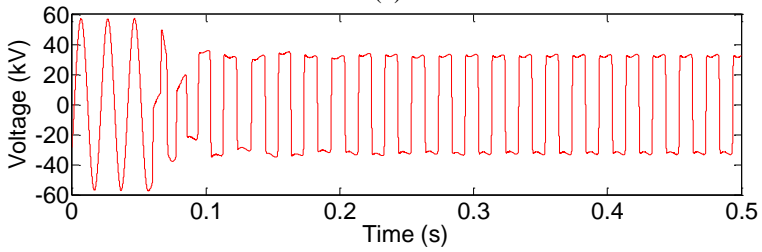
Gambar 4.11 adalah respon sinyal feroresonansi ketika nilai *grading capacitance* adalah 0,3 μF . Rangkaian yang disimulasikan menunjukkan respon sinyal yang berbeda pada inti trafo yang berbeda. Pada inti M5, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode chaotic dengan tegangan puncak mencapai 125,11 kV. Pada inti M0H, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode chaotic dengan tegangan puncak 138,38 kV. Pada inti ZDKH, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode quasi-periodik dengan tegangan puncak 117,99 kV.



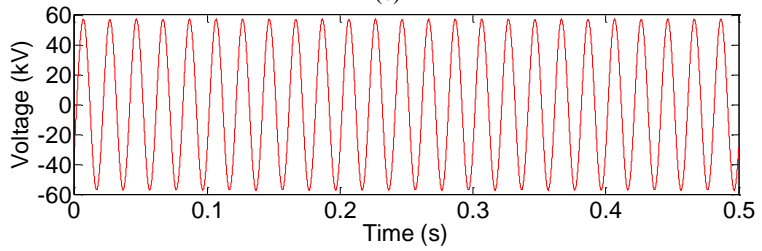
(a)



(b)

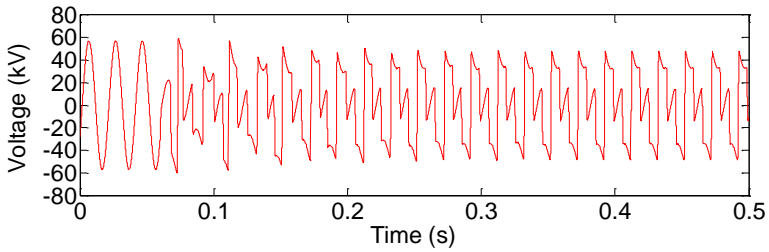


(c)

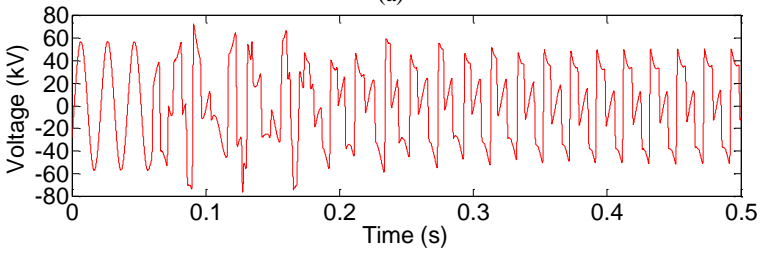


(d)

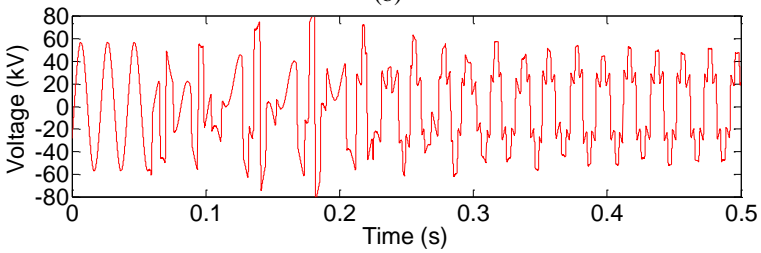
Gambar 4.8 Respon tegangan dengan C_g 0,005 μ f (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.



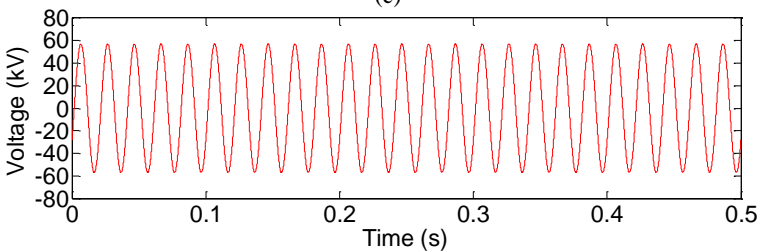
(a)



(b)

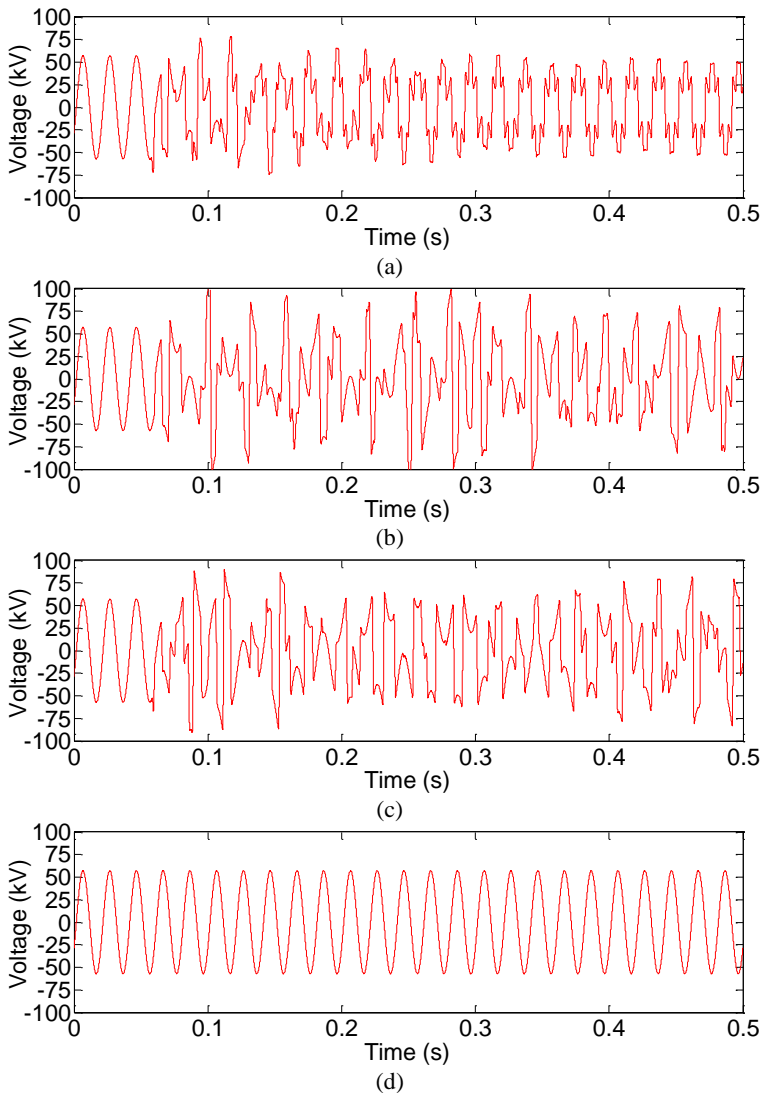


(c)

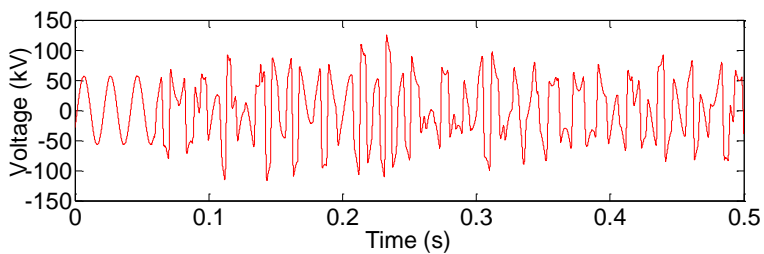


(d)

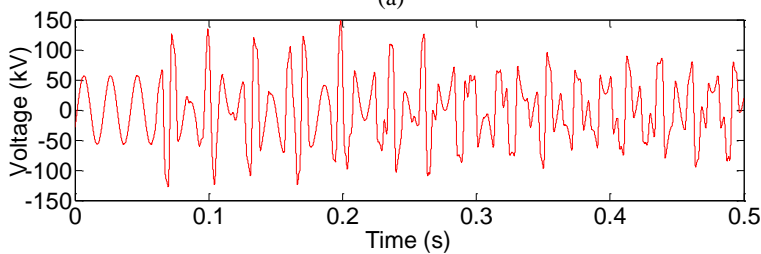
Gambar 4.9 Respon tegangan dengan C_g 0,03 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal..



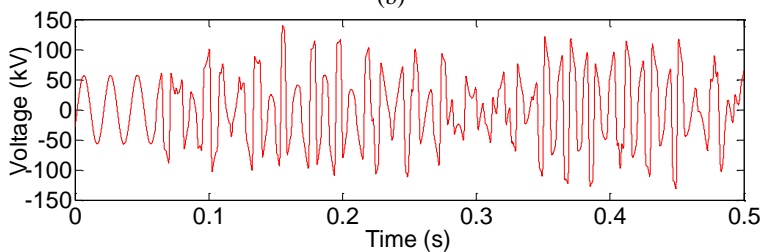
Gambar 4.10 Respon tegangan dengan $C_g 0,08 \mu f$ (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal..



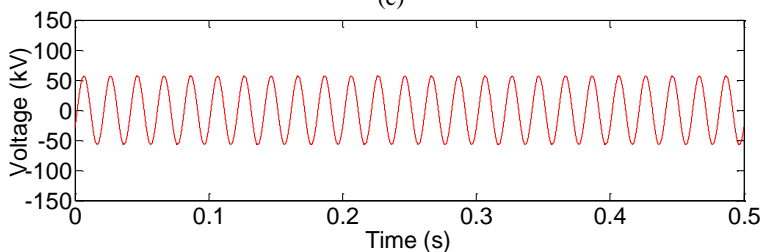
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.11 Respon tegangan dengan C_g 0,3 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal..

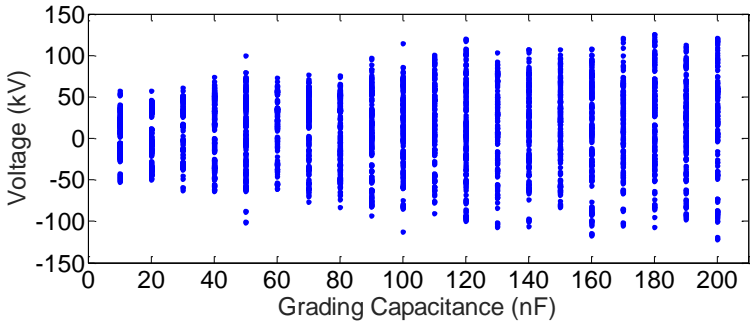
4.2.1.3 Diagram Bifurkasi Hasil Simulasi

Setelah data hasil simulasi menggunakan ATPDraw didapatkan, data diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk mendapatkan diagram bifurkasinya. Pada diagram bifurkasi ini variabel *grading capacitance* divariasikan dari 10 – 200 nF dengan kenaikan setiap 10 nF. Dengan nilai *shunt capacitance* konstan pada 50 nF.

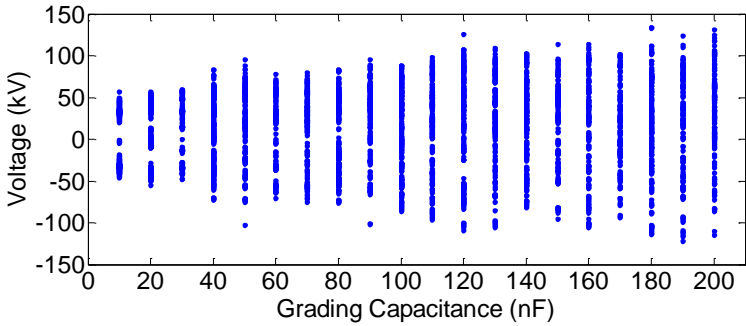
Gambar 4.12 – 4.14 menunjukkan hasil bifurkasi dari respon simulasi feroresonansi menggunakan parameter inti trafo M5, M0H, dan ZDKH. Ketiga gambar tersebut menunjukkan karakteristik yang relatif sama, yakni ketika nilai C_g kurang dari 50 nF, respon sistem relatif konstan pada 50 kV. Sedangkan ketika nilai C_g lebih dari 50 nF terlihat ada perubahan pada diagram bifurkasi berupa naiknya nilai tegangan puncak pada sistem. Hal ini mengindikasikan adanya gangguan tegangan lebih pada sistem.

Gambar 4.15 (a) menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode fundamental dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti M5 di fasa B saat nilai *grading capacitance* 30 nF. Gambar ini menjelaskan respon sinyal hasil simulasi yang di plot ke diagram bifurkasi. Respon sinyal fundamental yang ditandai dengan huruf “a” direpresentasikan oleh angka “1” pada diagram bifurkasi. Diagram bifurkasi dari mode fundamental memiliki ciri-ciri plot yang tersebar pada bagian yang ditandai oleh angka “1”.

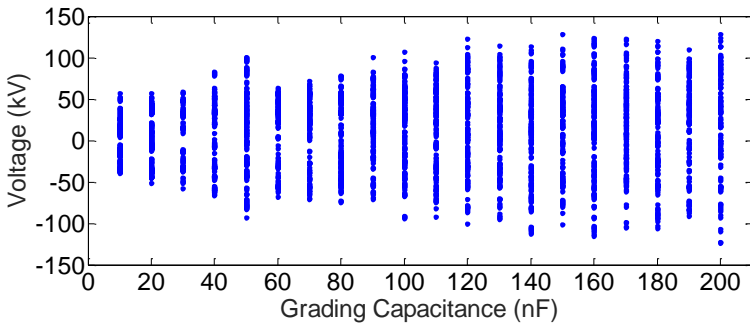
Gambar 4.15 (b) adalah respon sinyal feroresonansi mode subharmonik dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti M5 di fasa A saat nilai *grading capacitance* 10 nF. Respon sinyal bifurkasi yang ditandai dengan huruf “b” dan “c” direpresentasikan oleh angka “2” dan “3” pada diagram bifurkasi. Perbedaan diagram bifurkasi mode subharmonic dengan diagram bifurkasi mode fundamental adalah adanya plot diagram di area “2” diantara plot diagram di area “3”.



(a)

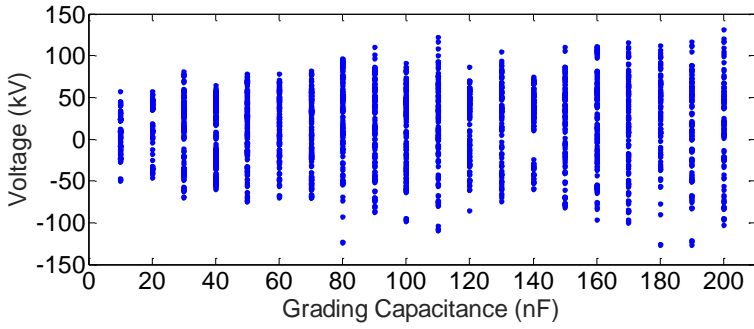


(b)

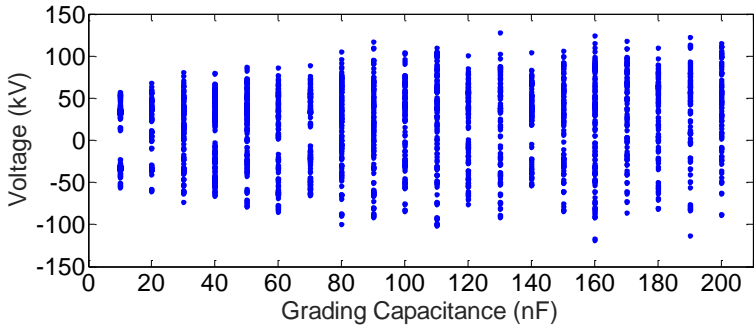


(c)

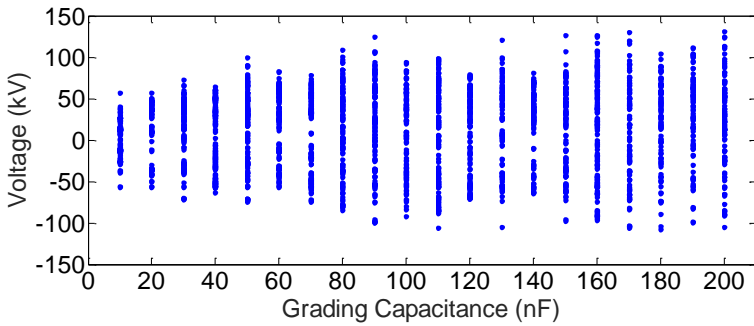
Gambar 4.12 Diagram bifurkasi variasi *grading capacitance* pada inti M5 (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



(a)

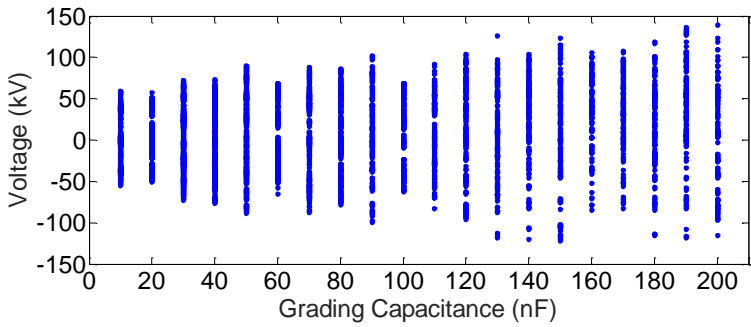


(b)

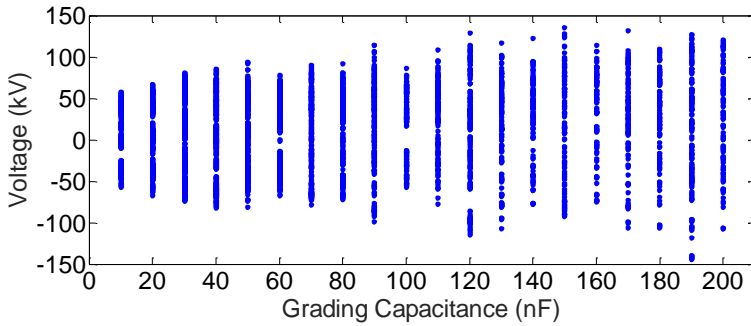


(c)

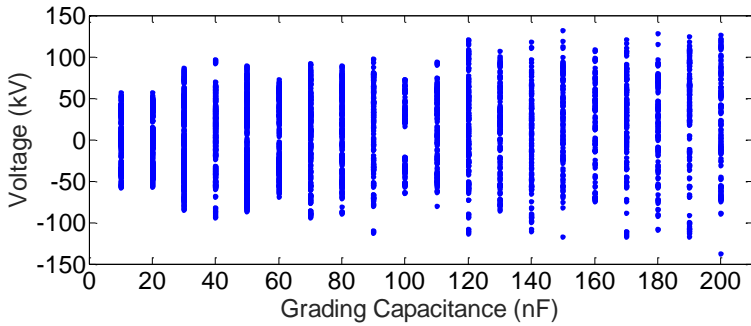
Gambar 4.13 Diagram bifurkasi variasi *grading capacitance* pada inti M0H (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



(a)



(b)

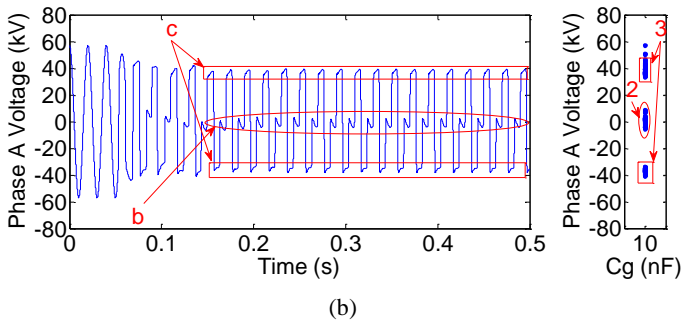
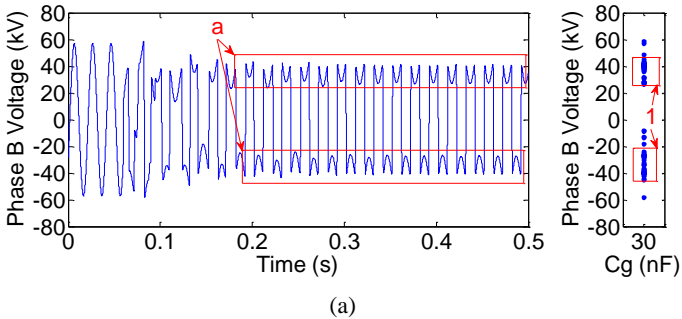


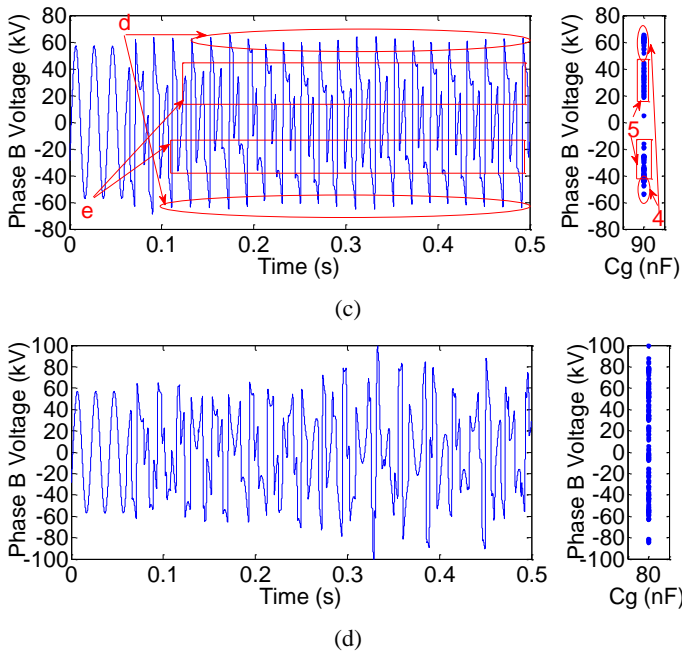
(c)

Gambar 4.14 Diagram bifurkasi variasi *grading capacitance* pada inti ZDKH (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C

Gambar 4.15 (c) adalah respon sinyal feroresonansi mode quasi-periodik dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti M5 di fasa B saat nilai *grading capacitance* 90 nF. Respon sinyal bifurkasi yang ditandai dengan huruf “d” dan “e” direpresentasikan oleh angka “4” dan “5” pada diagram bifurkasi. Perbedaan diagram bifurkasi mode quasi-periodik dengan diagram bifurkasi mode subharmonic adalah plot diagram di area “5” relatif lebih luas jika dibandingkan dengan area “3” pada bifurkasi mode subharmonic. Hal ini Menunjukkan bahwa tegangan puncak pada sinyal feroresonansi mode quasi-periodik lebih fluktuatif jika dibandingkan dengan sinyal feroresonansi subharmonic. Selain itu perbedaan yang terlihat adalah tidak adanya area “2” pada plot diagram bifurkasi quasi-periodik.

Gambar 4.15 (d) adalah respon sinyal feroresonansi mode chaotic dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti M5 di fasa B saat nilai *grading capacitance* 80 nF. Respon sinyal chaotic memiliki nilai puncak yang beragam sehingga pada diagram bifurkasinya terdapat plot yang sangat luas areanya sehingga agak sulit untuk diidentifikasi.





Gambar 4.15 Diagram bifurkasi variasi *grading capacitance* pada inti M5 (a) Mode fundamental (b) Mode subharmonik (c) Mode quasi-periodik (d) Mode chaotic

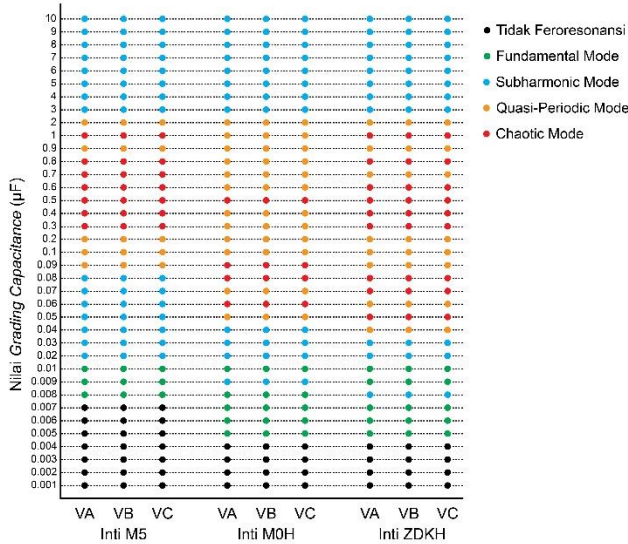
Perbandingan hasil simulasi rangkaian dengan perbedaan inti transformator dan variasi nilai *grading capacitance* dapat dilihat pada tabel 4.1. Berdasarkan tabel 4.1 dapat terlihat bahwa walaupun terdapat pengaruh induktansi mutual, mode respon feroresonansi antar fasanya adalah sama, akan tetapi memiliki perbedaan pada amplitude dan bentuk responnya. Pada inti M5 terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval $0,008 - 10 \mu\text{F}$. Pada inti M0H terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval $0,005 - 10 \mu\text{F}$. Sedangkan pada inti ZDKH terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval $0,005 - 10 \mu\text{F}$.

Dari tabel 4.1 dapat dibuat sebuah diagram hasil simulasi seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.16. Dari gambar ini terlihat jelas perbandingan respon sinyal feroresonansi antara inti M5, M0H, dan ZDKH. Jika diamati dari gambar 4.16, terlihat bahwa transformator dengan inti M5 memiliki respon sinyal feroresonansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan inti lainnya. Hal ini dapat dilihat juga dari gambar

bifurkasinya seperti pada gambar 4.12, dimana inti M5 memiliki nilai tegangan puncak yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan inti M0H dan ZDKH.

Tabel 4.1 Perbandingan mode feroresonansi pada respon tegangan

Karakteristik	Nilai <i>grading capacitance</i> pada respon tegangan (μF)		
	Tegangan Fasa A, B, dan C Inti M5	Tegangan Fasa A, B, dan C Inti M0H	Tegangan Fasa A, B, dan C Inti ZDKH
Tidak Feroresonansi	0,001 - 0,007	0,001 - 0,004	0,001 - 0,004
<i>Fundamental mode</i>	0,008 - 0,009 0,01	0,005 - 0,008 0,01	0,005 – 0,007 0,009 0,01
<i>Subharmonic mode</i>	0,02 – 0,08 3 – 10	0,009 0,03 – 0,04 3 – 10	0,008 0,02 – 0,03 3 – 10
<i>Quasi-Periodic mode</i>	0,09 0,1 – 0,2 0,9 2	0,05 , 0,07 0,1 – 0,4 0,6 – 0,9 1 – 2	0,04 , 0,06 , 0,09 0,1 – 0,2 0,7 , 0,9 2
<i>Chaotic mode</i>	0,3 – 0,8 1	0,06 0,08 – 0,09 0,05	0,05 , 0,07 - 0,08 0,3 – 0,6 0,8 , 1



Gambar 4.16 Diagram hasil simulasi inti M5, M0H, dan ZDKH dengan variasi C_g

4.2.2 Ferroresonansi Akibat Variasi *Shunt Capacitance* (C_s)

Shunt capacitance (C_s) merupakan kapasitansi yang muncul antara konduktor transmisi dengan ground. *Shunt Capacitance* bersifat paralel terhadap rangkaian. Pada studi ini, nilai *shunt capacitance* divariasikan antara 0,001 – 10 μF dan nilai *grading capacitance* konstan pada 0,05 μF . Pada kondisi realnya, nilai C_s dapat berbeda-beda karena jarak konduktor dengan tanah dapat berbeda-beda pula.

4.2.2.1 Respon Tegangan Tiga Fasa

Gambar 4.17 – 4.22 Menunjukkan plot hasil respon tegangan tiap fasa pada simulasi menggunakan ATPDraw. Gambar 4.17 – 4.19 menunjukkan respon tegangan inti M5, M0H, dan ZDKH ketika *shunt capacitance* bernilai kurang dari 0,05 μF . Gambar 4.17 menunjukkan respon tegangan pada inti M5 ketika *shunt capacitance* bernilai 0,03 μF . Terlihat pada respon tiap fasanya menunjukkan mode ferroresonansi tipe quasi-periodik. Respon sinyal pada fasa A memiliki tegangan puncak 63,08 kV. Respon sinyal pada fasa B memiliki tegangan puncak 63,15 kV. Respon sinyal pada fasa C memiliki tegangan puncak 64,68 kV.

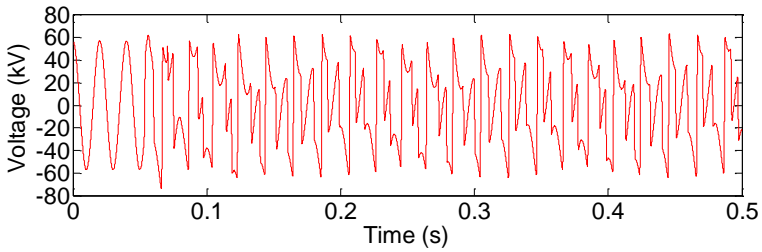
Gambar 4.18 menunjukkan respon tegangan pada inti M0H ketika *shunt capacitance* bernilai 0,03 μF . Fasa A, B, dan C menunjukkan mode feroresonansi tipe subharmonik. Tegangan Fasa A *steady state* setelah detik 0,14 s dan memiliki nilai puncak 63,19 kV. Tegangan fasa B *steady state* setelah detik 0,15 s dan memiliki nilai puncak 65,29 kV, dan tegangan fasa C *steady state* setelah detik 0,16 s dan memiliki nilai puncak 65,47 kV.

Gambar 4.19 menunjukkan respon tegangan pada inti ZDKH ketika *grading capacitance* bernilai 0,03 μF . Fasa A, B, dan C menunjukkan mode feroresonansi tipe chaotic. Respon sinyal pada fasa A memiliki tegangan puncak 99,31 kV. Respon sinyal pada fasa B memiliki tegangan puncak 101,07 kV. Respon sinyal pada fasa C memiliki tegangan puncak 102,47 kV.

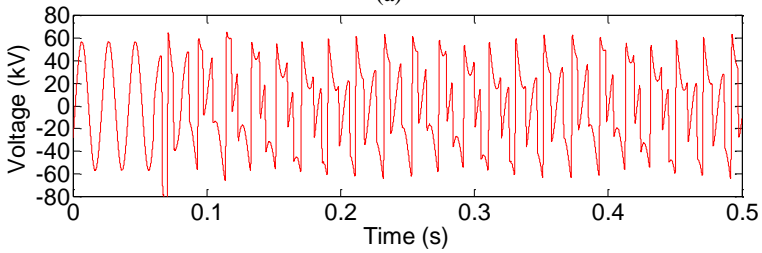
Gambar 4.20 – 4.22 menunjukkan respon tegangan inti M5, M0H, dan ZDKH ketika *shunt capacitance* bernilai lebih dari 0,05 μF . Gambar 4.20 menunjukkan respon tegangan pada inti M5 ketika *shunt capacitance* bernilai 0,09 μF . Terlihat pada respon tiap fasanya menunjukkan mode feroresonansi tipe subharmonik. Respon sinyal pada fasa A *steady state* setelah detik ke 0,12s dengan tegangan puncak 54,12 kV. Respon sinyal pada fasa B *steady state* setelah detik ke 0,13 s dengan tegangan puncak 53,33 kV. Respon sinyal pada fasa C *steady state* setelah detik ke 0,12 s dengan tegangan puncak 56,43 kV.

Gambar 4.21 menunjukkan respon tegangan pada inti M0H ketika *grading capacitance* bernilai 0,09 μF . Terlihat pada respon tiap fasanya menunjukkan mode feroresonansi tipe quasi-periodik. Respon sinyal pada fasa A memiliki tegangan puncak 79,55 kV. Respon sinyal pada fasa B memiliki tegangan puncak 80,66 kV. Respon sinyal pada fasa C memiliki tegangan puncak 78,12 kV.

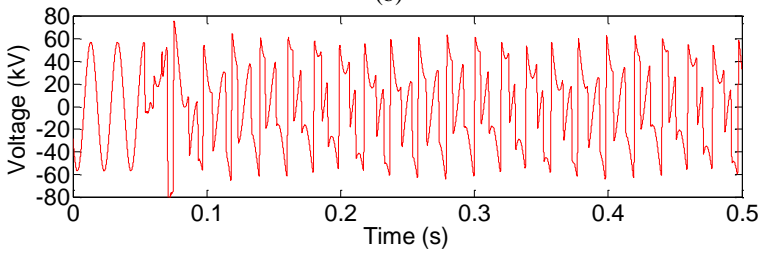
Gambar 4.22 menunjukkan respon tegangan pada inti ZDKH ketika *grading capacitance* bernilai 0,09 μF . Fasa A, B, dan C menunjukkan mode feroresonansi tipe chaotic. Respon sinyal pada fasa A memiliki tegangan puncak 80,81 kV. Respon sinyal pada fasa B memiliki tegangan puncak 72,44 kV. Respon sinyal pada fasa C memiliki tegangan puncak 81,55 kV.



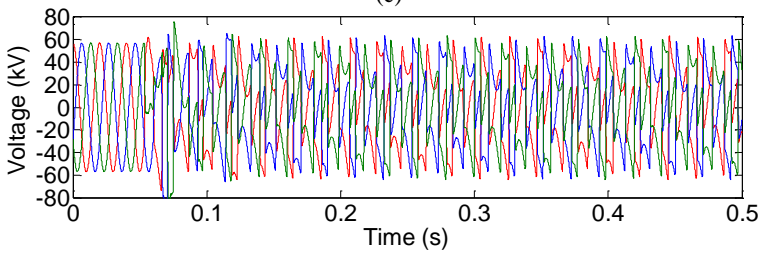
(a)



(b)

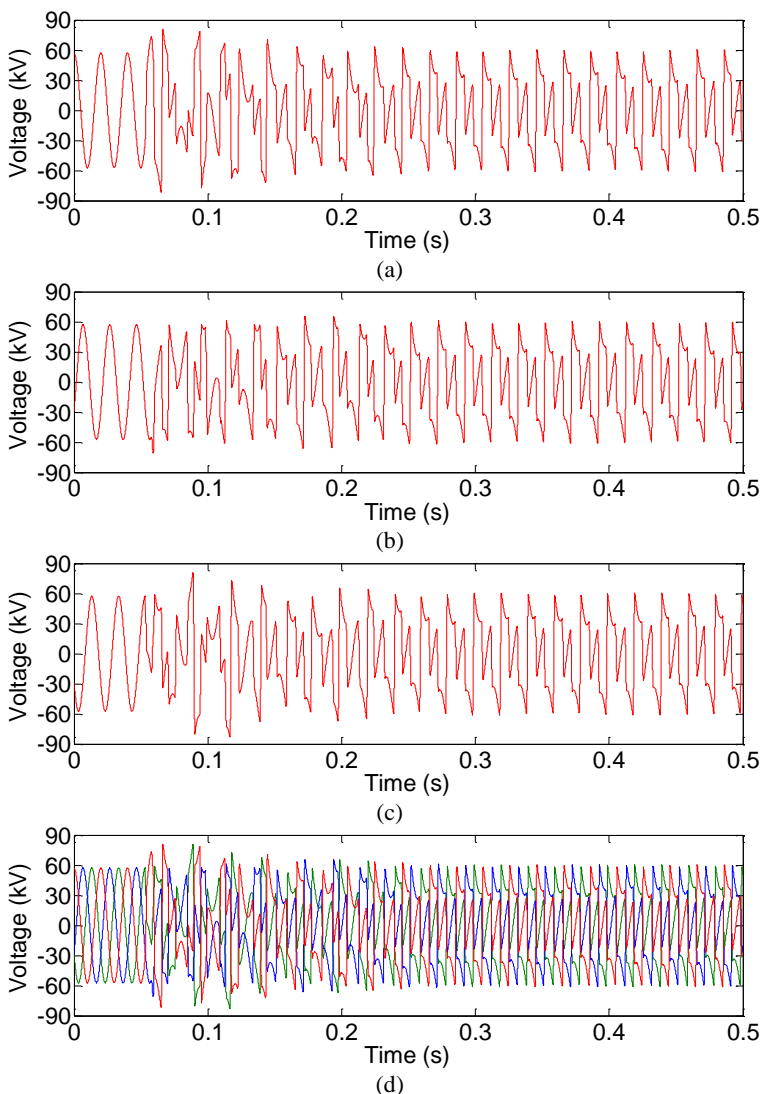


(c)

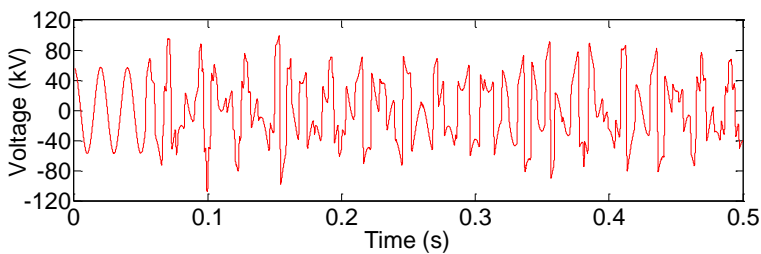


(d)

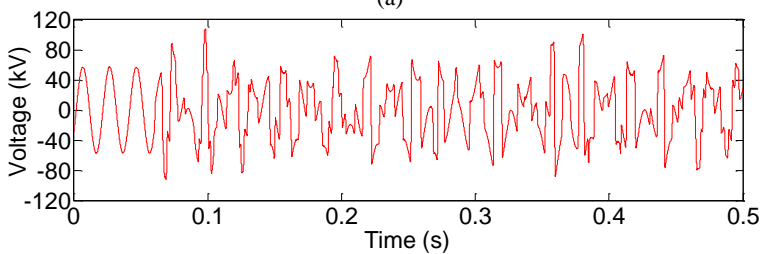
Gambar 4.17 Respon tegangan pada inti M5 dengan C_s 0,03 μ f (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



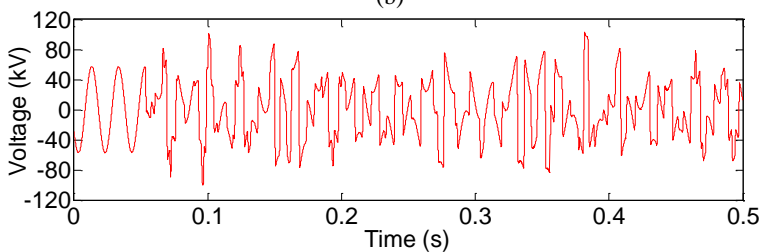
Gambar 4.18 Respon tegangan pada inti M0H dengan C_s $0,03 \mu\text{f}$ (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



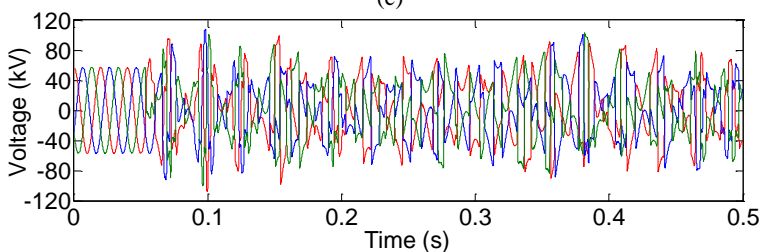
(a)



(b)

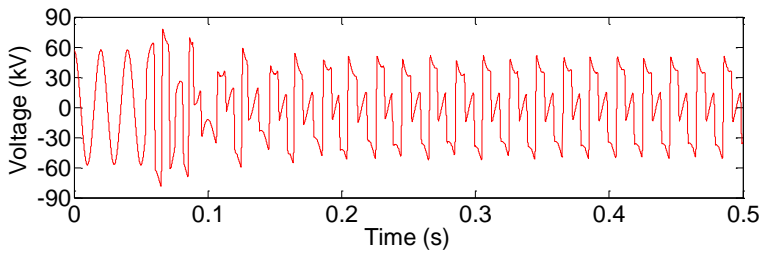


(c)

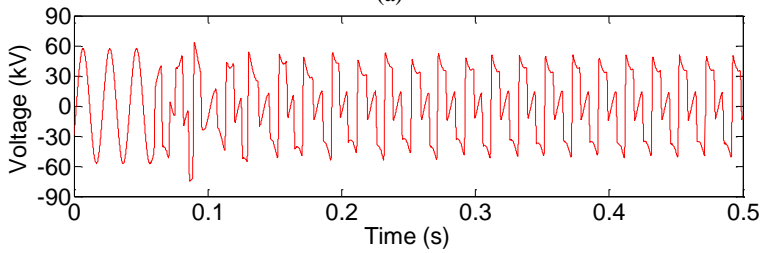


(d)

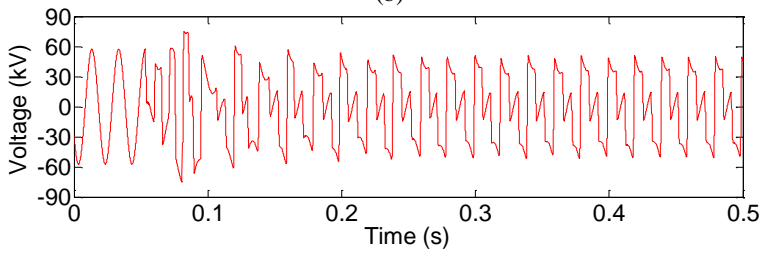
Gambar 4.19 Respon tegangan pada inti ZDKH dengan Cs 0,03 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



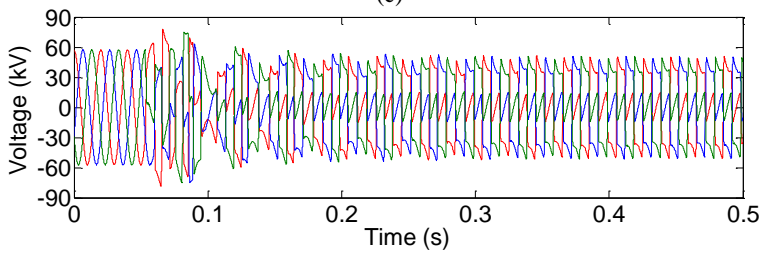
(a)



(b)

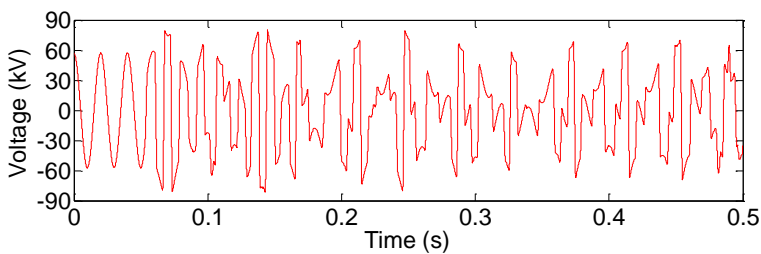


(c)

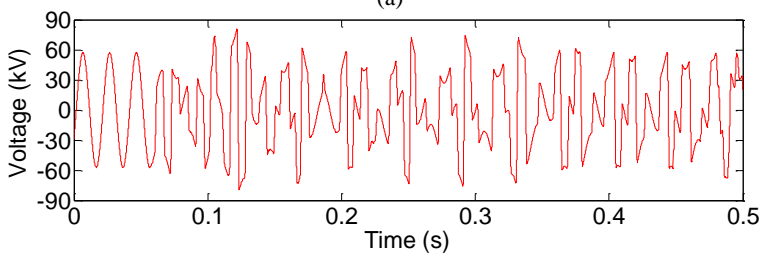


(d)

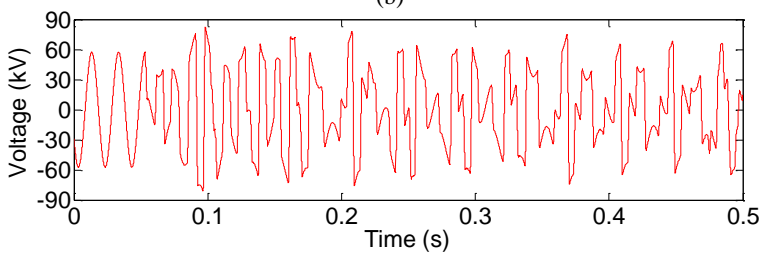
Gambar 4.20 Respon tegangan pada inti M5 dengan C_s $0,09 \mu f$ (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



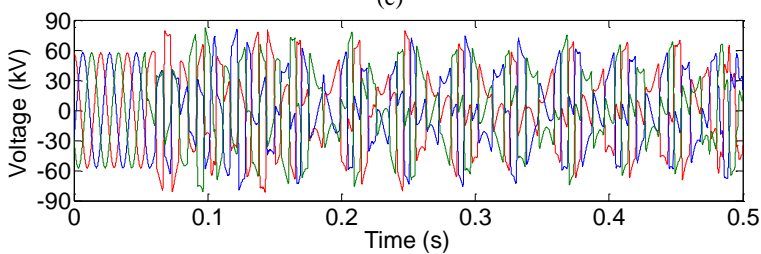
(a)



(b)

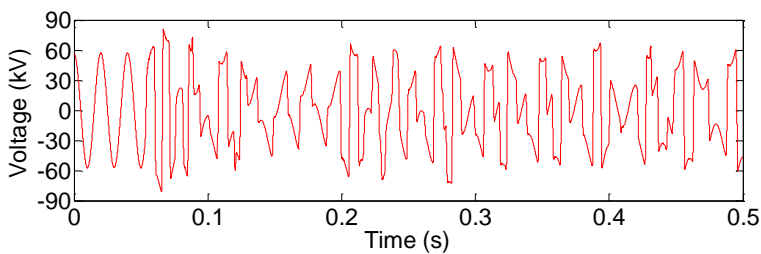


(c)

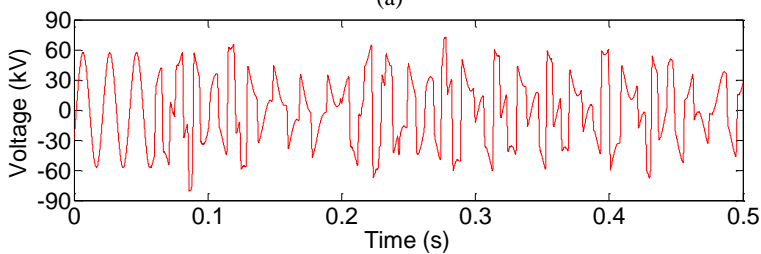


(d)

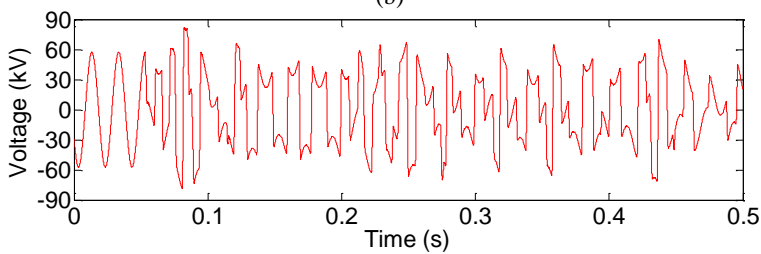
Gambar 4.21 Respon tegangan pada inti M0H dengan Cs 0,09 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa



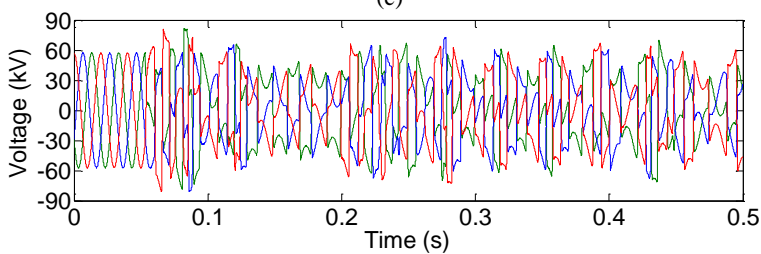
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.22 Respon tegangan pada inti ZDKH dengan C_s 0,09 μf (a) Respon tegangan pada fasa A (b) Respon tegangan pada fasa B (c) Respon tegangan pada fasa C (d) Respon tegangan tiga fasa

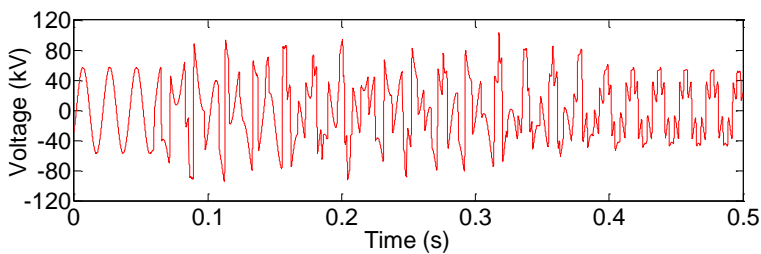
4.2.2.2 Perbandingan Respon Tegangan Satu Fasa Inti Transformator M5, M0H, dan ZDKH

Gambar 4.23 Menunjukkan hasil plot respon tegangan fasa B pada simulasi mengguakan ATPDraw. Ketika *shunt capacitance* bernilai 0,008 μF , terlihat ketiga rangkaian dengan inti berbeda menunjukkan respon feroresonansi yang berbeda. Pada inti M5 menunjukkan respon subharmonik dengan tegangan puncak pada saat *steady state* 0,39s sebesar 57,51 kV. Respon feroresonansi pada inti M0H menunjukkan respon chaotic dengan tegangan puncak 106,49 kV. Sedangkan pada inti ZDKH menunjukkan respon chaotic dengan tegangan puncak 108,07 kV.

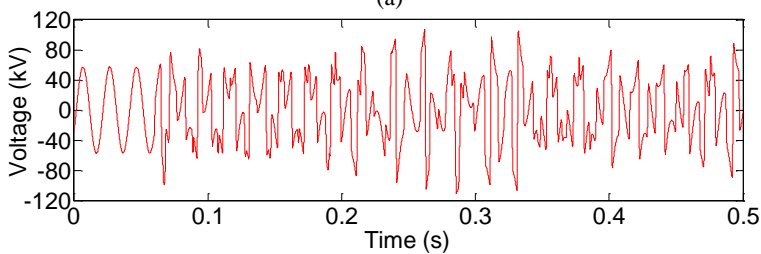
Respon rangkaian mulai terlihat berbeda ketika nilai *grading capacitance* dinaikkan hingga 10 kali lipatnya. Gambar 4.24 adalah respon sinyal feroresonansi ketika *shunt capacitance* bernilai 0,03 μF . Respon sinyal menunjukkan hasil yang berbeda-beda pada inti trafo yang berbeda. Pada inti M5, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode quasi-periodik dengan tegangan puncak 63,15 kV. Pada inti M0H, sinyal terlihat *steady state* setelah detik ke 0,15s. Respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonic dengan tegangan puncak 65,29 kV. Pada inti ZDKH, sinyal menunjukkan respon feroresonansi mode chaotic dengan tegangan puncak 101,07 kV.

Gambar 4.25 menunjukkan respon sinyal yang berbeda-beda pada inti trafo yang berbeda ketika *shunt capacitance* bernilai 0,06 μF . Pada inti M5, sinyal baru terlihat *steady state* pada detik ke 0,15s, dengan respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonic dengan tegangan puncak 57,11 kV. Pada inti M0H, sinyal terlihat *steady state* setelah detik ke 0,21s. Respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonic dengan tegangan puncak 62,57 kV. Pada inti ZDKH, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode fundamental saat *steady state* pada 0,23s dengan tegangan puncak 51,15 kV.

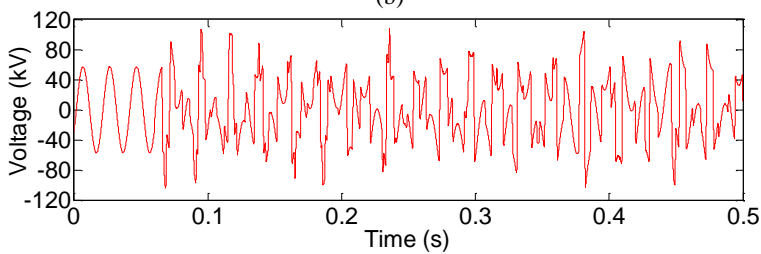
Gambar 4.26 menunjukkan respon sinyal yang berbeda-beda pada inti trafo yang berbeda ketika *shunt capacitance* bernilai 0,09 μF . Pada inti M5, sinyal baru terlihat *steady state* pada detik ke 0,13s, kemudian menjadi stabil *steady state* dengan respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode subharmonic dengan tegangan puncak 53,33 kV. Pada inti M0H, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode quasi-periodik dengan tegangan puncak 80,66 kV. Pada inti ZDKH, respon sinyal feroresonansi menunjukkan mode chaotic dengan tegangan puncak 72,44 kV.



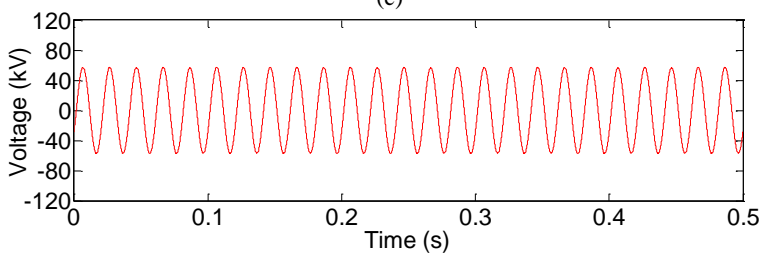
(a)



(b)

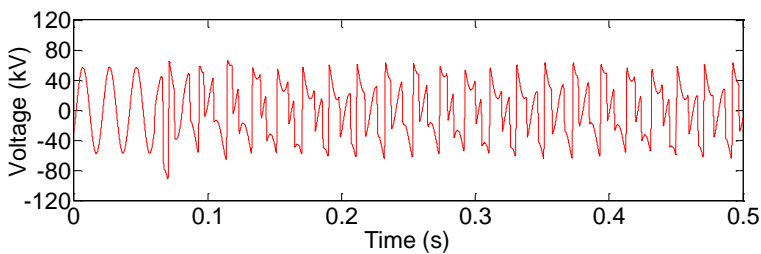


(c)

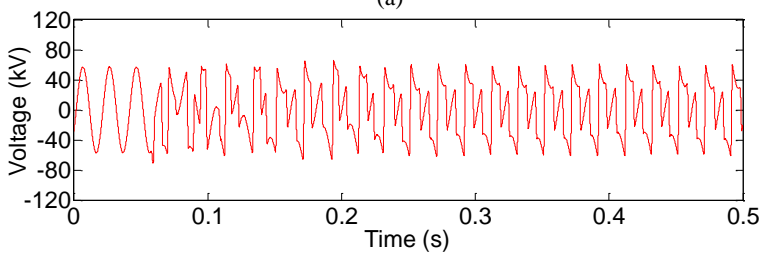


(d)

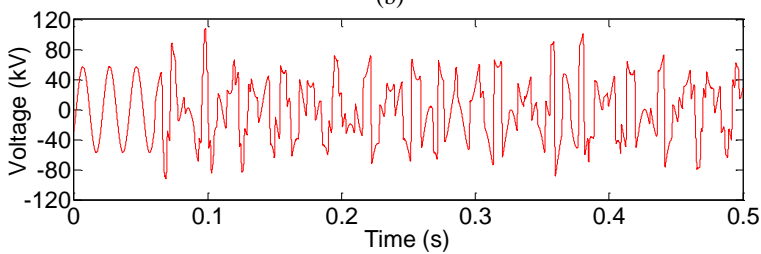
Gambar 4.23 Respon tegangan dengan Cs 0,008 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.



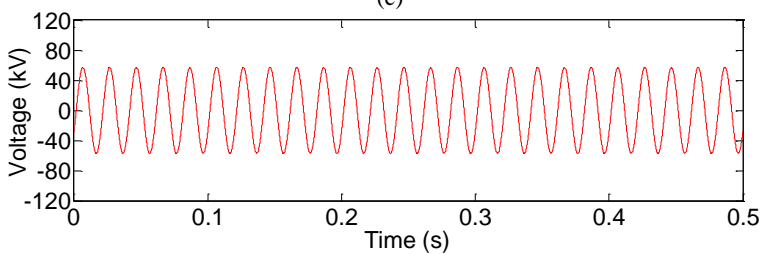
(a)



(b)

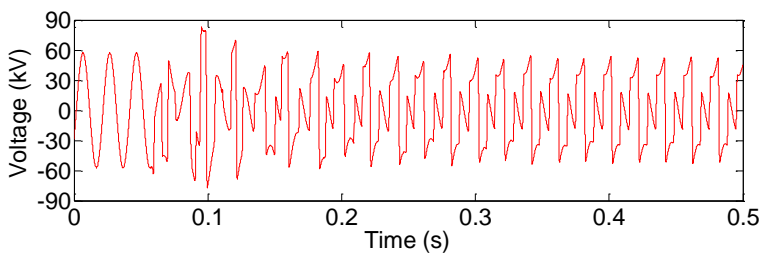


(c)

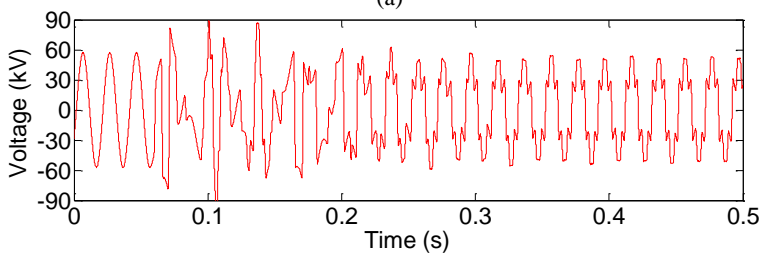


(d)

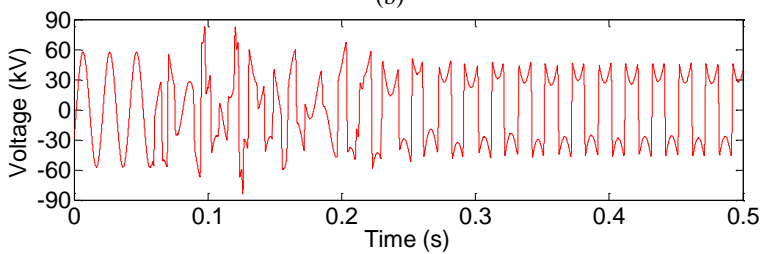
Gambar 4.24 Respon tegangan dengan Cs 0,03 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.



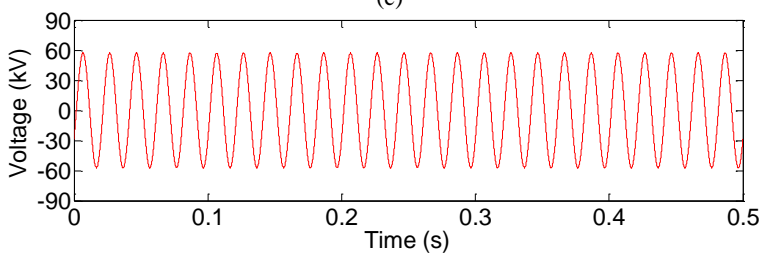
(a)



(b)

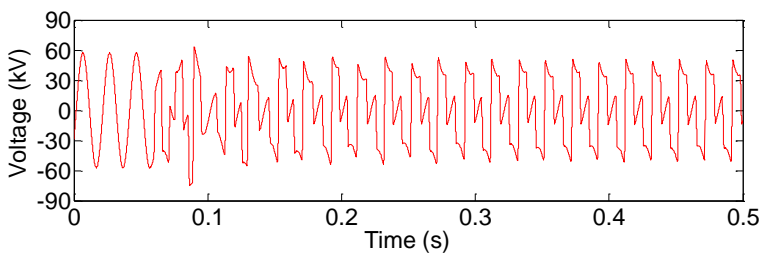


(c)

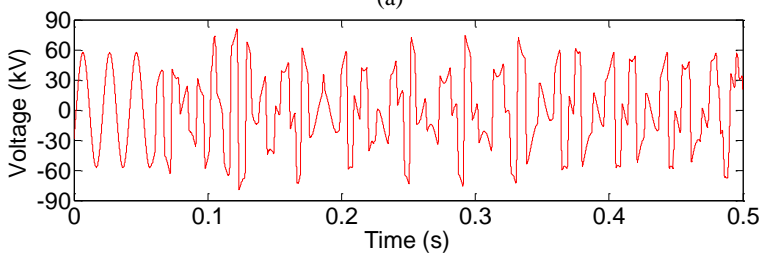


(d)

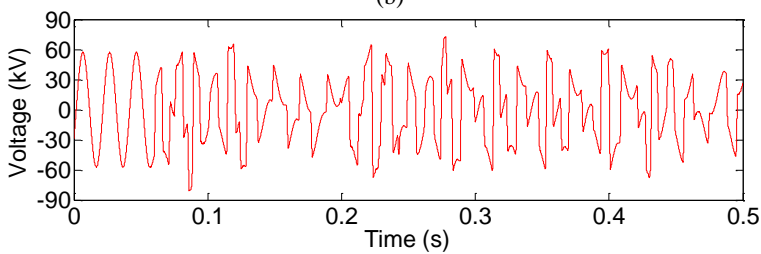
Gambar 4.25 Respon tegangan dengan Cs 0,06 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.



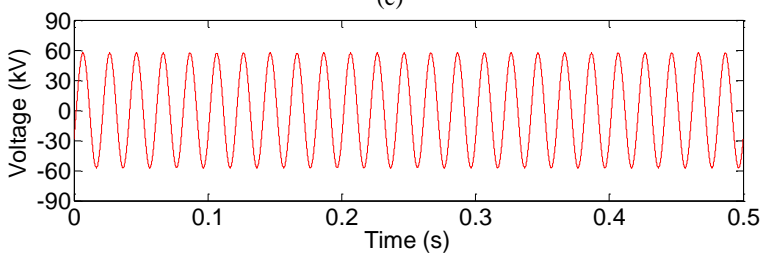
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.26 Respon tegangan dengan Cs 0,09 μf (a) Respon tegangan pada inti M5 (b) Respon tegangan pada inti M0H (c) Respon tegangan pada inti ZDKH (d) Respon tegangan pada keadaan normal.

4.2.2.3 Diagram Bifurkasi Hasil Simulasi

Setelah data hasil simulasi menggunakan ATPDraw didapatkan, data diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk mendapatkan diagram bifurkasinya. Pada diagram bifurkasi ini variabel *shunt capacitance* divariasikan dari 10 – 100 nF dengan kenaikan setiap 5 nF. Dengan nilai *grading capacitance* konstan pada 50 nF.

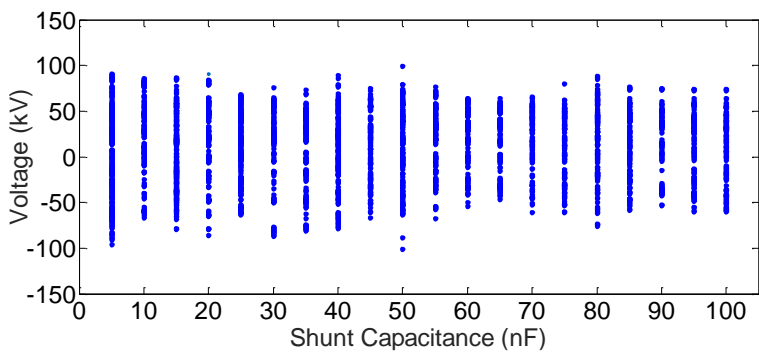
Gambar 4.27 – 4.29 menunjukkan hasil bifurkasi dari respon simulasi feroresonansi menggunakan parameter inti trafo M5, M0H, dan ZDKH. Ketiga gambar tersebut menunjukkan karakteristik yang relatif sama, yakni ketika nilai C_s kurang dari 50 nF, nilai tegangan puncak pada sistem relatif lebih besar dari tegangan normalnya. Hal ini mengindikasikan adanya gangguan tegangan lebih pada sistem. Sedangkan ketika nilai C_s lebih dari 50 nF, respon sistem pada inti M5 relatif konstan pada 60 kV, sedangkan pada inti M0H dan ZDKH responnya fluktuatif. Hal ini dikarenakan saat simulasi berakhir pada 0,5s respon tegangan masih transient.

Gambar 4.30 (a) menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode fundamental dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti ZDKH di fasa B saat nilai *shunt capacitance* 60 nF. Gambar ini menjelaskan respon sinyal hasil simulasi yang di plot ke diagram bifurkasi. Respon sinyal fundamental yang ditandai dengan huruf “a” direpresentasikan oleh angka “1” pada diagram bifurkasi.

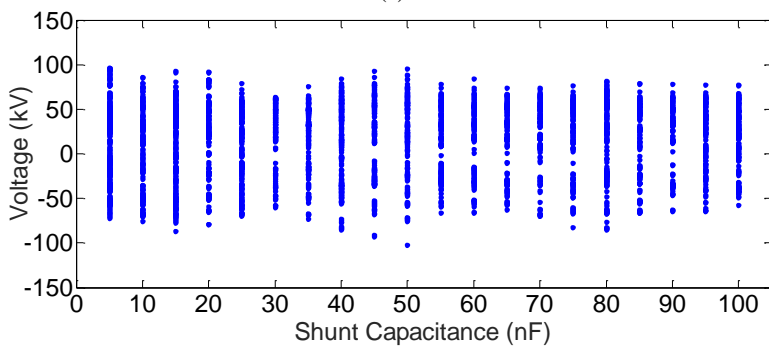
Gambar 4.30 (b) adalah respon sinyal feroresonansi mode subharmonik dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti M5 di fasa B saat nilai *shunt capacitance* 60 nF. Respon sinyal bifurkasi yang ditandai dengan huruf “b” dan “c” direpresentasikan oleh angka “2” dan “3” pada diagram bifurkasi. Perbedaan diagram bifurkasi mode subharmonic dengan diagram bifurkasi mode fundamental adalah adanya plot diagram di area “2” diantara plot diagram di area “3”.

Gambar 4.30 (c) adalah respon sinyal feroresonansi mode quasi-periodik dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti M5 di fasa B saat nilai *grading capacitance* 30 nF. Respon sinyal bifurkasi yang ditandai dengan huruf “d” dan “e” direpresentasikan oleh angka “4” dan “5” pada diagram bifurkasi.

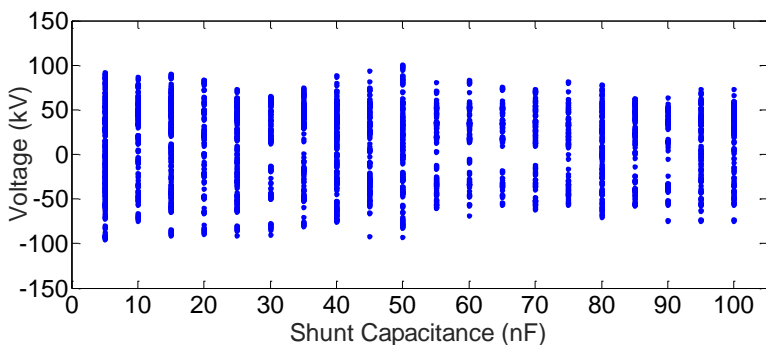
Gambar 4.30 (d) adalah respon sinyal feroresonansi mode chaotic dan cuplikan dari diagram bifurkasi pada inti ZDKH di fasa B saat nilai *grading capacitance* 30 nF. Respon sinyal chaotic memiliki nilai puncak yang beragam sehingga pada diagram bifurkasinya terdapat plot yang sangat luas areanya sehingga agak sulit untuk diidentifikasi.



(a)

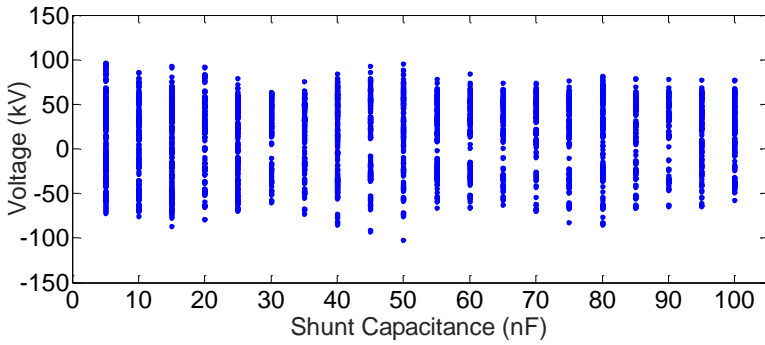


(b)

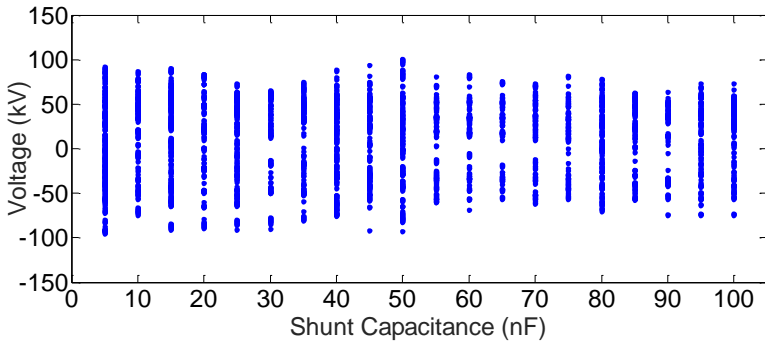


(c)

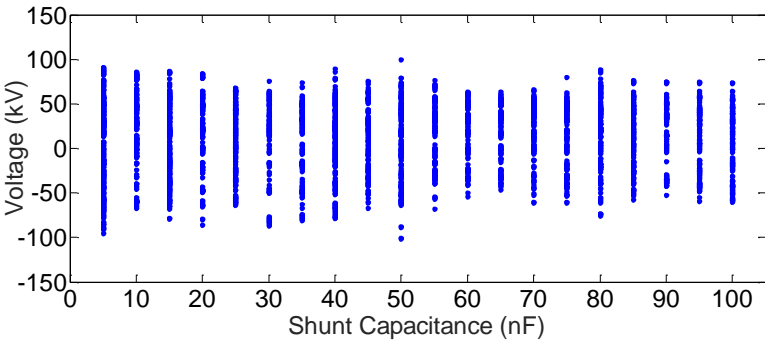
Gambar 4.27 Diagram bifurkasi variasi *shunt capacitance* pada inti M5 (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



(a)

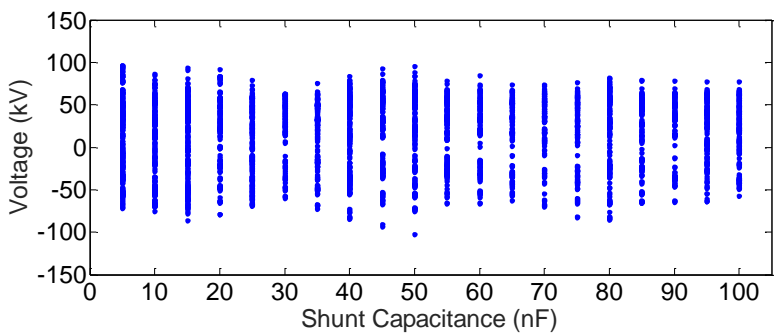


(b)

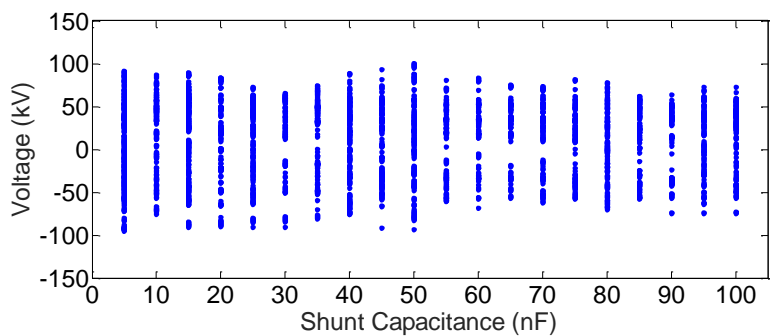


(c)

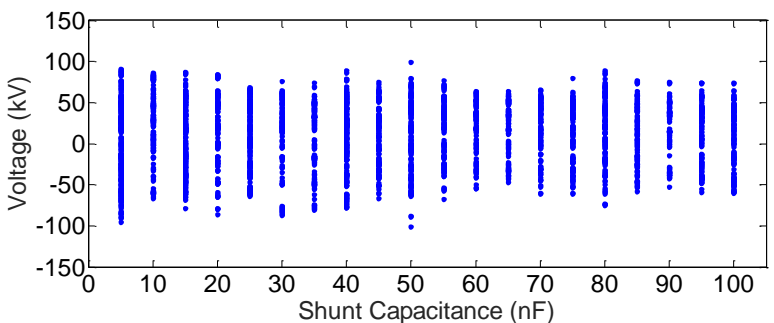
Gambar 4.28 Diagram bifurkasi variasi *shunt capacitance* pada inti M0H (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



(a)

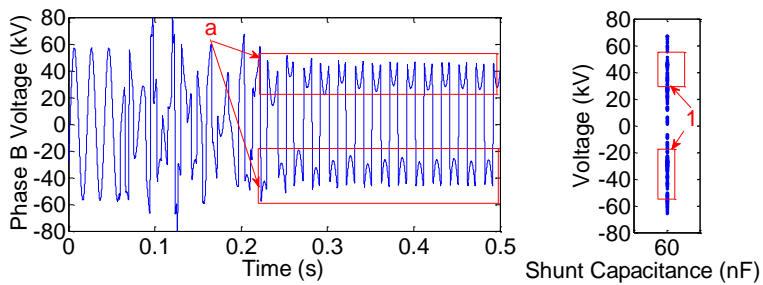


(b)

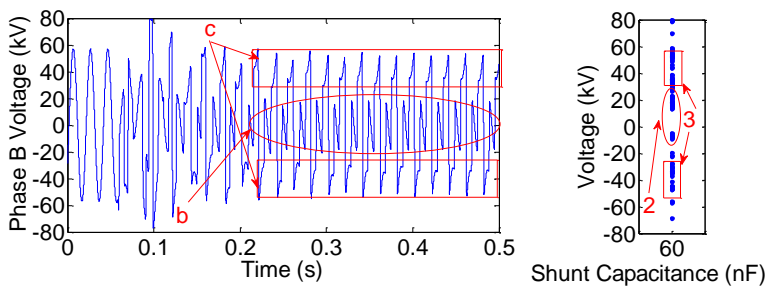


(c)

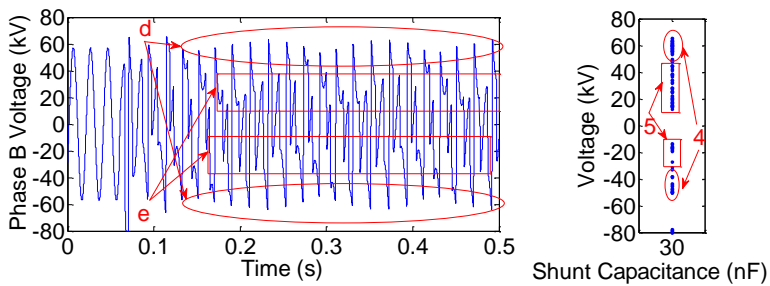
Gambar 4.29 Diagram bifurkasi variasi *shunt capacitance* pada inti ZDKH (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



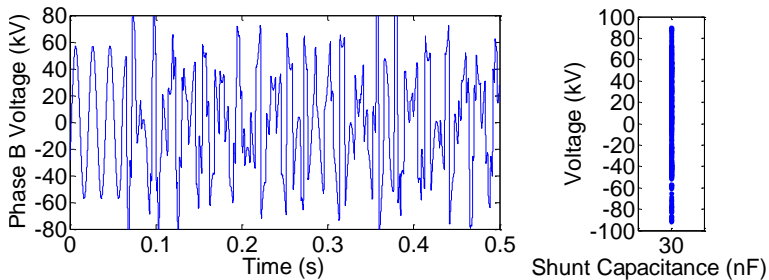
(a)



(b)



(c)

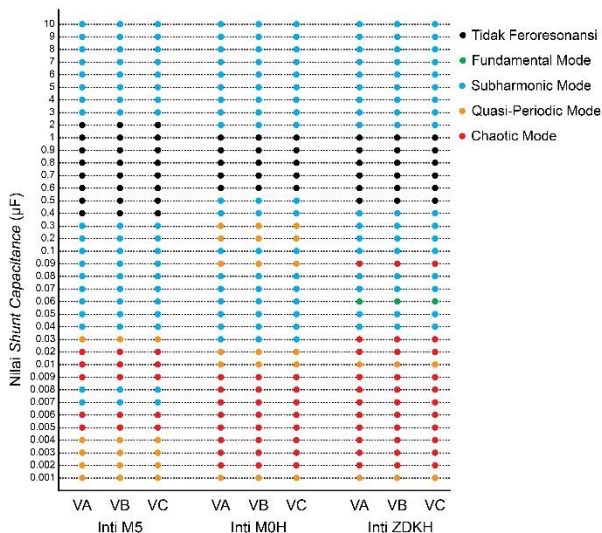


(a)

Gambar 4.30 Diagram bifurkasi variasi *shunt capacitance* pada inti M5 (a) Mode fundamental (b) Mode subharmonik (c) Mode quasi-periodik (d) Mode chaotic

Perbandingan hasil simulasi rangkaian dengan perbedaan inti transformator dan variasi nilai *shunt capacitance* dapat dilihat pada tabel 4.2. Berdasarkan tabel 4.2 terlihat bahwa karakteristik feroresonansi pada respon tegangan antar fasanya sama, walaupun berbeda pada amplitudonya. Pada inti M5 terlihat bahwa feroresonansi tidak terjadi hanya pada interval $0,4 - 0,9 \mu\text{F}$ dan $1 - 2 \mu\text{F}$. Pada inti M0H feroresonansi tidak terjadi ketika nilai C_s $0,6 - 0,9 \mu\text{F}$ dan $1 \mu\text{F}$. Sedangkan pada inti ZDKH terlihat bahwa feroresonansi tidak terjadi pada interval $0,5 - 0,9 \mu\text{F}$ dan $1 \mu\text{F}$.

Dari tabel 4.2 dapat dibuat sebuah diagram hasil simulasi seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.31. Dari gambar ini terlihat jelas perbandingan respon sinyal feroresonansi antara inti M5, M0H, dan ZDKH. Jika diamati dari gambar 4.31, terlihat bahwa transformator dengan inti M5 memiliki respon sinnyal feroresonansi yang lebih baik dibanding dengan inti lainnya. Hal ini dapat dilihat juga dari diagram bifurkasinya seperti pada gambar 4.27, dimana inti M5 memiliki nilai tegangan puncak yang relatif lebih rendah dan stabil jika dibandingkan dengan inti M0H dan ZDKH.



Gambar 4.31 Diagram hasil simulasi inti M5, M0H, dan ZDKH dengan variasi Cs

Tabel 4.2 Perbandingan mode ferroresonansi pada respon tegangan

Karakteristik	Nilai grading capacitance pada respon tegangan (µF)		
	Tegangan Fasa A, B, dan C Inti M5	Tegangan Fasa A, B, dan C Inti M0H	Tegangan Fasa A, B, dan C Inti ZDKH
Tidak Ferroresonansi	0,4 – 0,9 1 – 2	0,6 – 0,9 1	0,5 – 0,9 1
Fundamental mode	Tidak Ada	Tidak Ada	0,06
Subharmonic mode	0,007 – 0,008 0,04 – 0,09 0,1 – 0,3 3 – 10	0,03 – 0,08 0,1 ; 0,4 – 0,5 2 – 10	0,04 – 0,05 0,07 – 0,08 0,1 – 0,4 2 – 10
Quasi-Periodic mode	0,001 – 0,004 0,03	0,001 0,01 – 0,02 ; 0,09 0,2 – 0,3	0,001 0,01
Chaotic mode	0,005 – 0,006 0,009 ; 0,01 – 0,02	0,002 – 0,009	0,002 – 0,009 0,02 – 0,03 0,09

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai karakteristik histerisis inti transformator terhadap gangguan feroresonansi, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan karakteristik inti transformator mempengaruhi respon gangguan feroresonansi.
2. Pemodelan transformator 1x3 fasa mempengaruhi respon gangguan feroresonansi antar fasanya. Yakni berupa perbedaan di bentuk mode gangguan feroresonansi dan tegangan puncaknya ketika nilai variabel *grading capacitance* lebih kecil dari nilai variabel *shunt capacitance*. Akan tetapi respon sinyalnya memiliki respon feroresonansi dengan mode yang sama.
3. Pemodelan transformator 1x3 fasa tidak mempengaruhi respon gangguan feroresonansi antar fasanya ketika nilai variabel *shunt capacitance* divariasikan. Baik itu mode feroresonansinya secara bentuk dan nilai puncaknya.
4. Pada perbandingan respon tegangan dengan inti yang berbeda, terdapat perbedaan respon feroresonansi, dari segi mode feroresonansi dan tegangan puncaknya. Hal ini berlaku ketika variasi nilai *grading capacitance* dan variasi nilai *shunt capacitance*.
5. Pada diagram bifurkasi dengan variasi *grading capacitance*, kestabilan sistem terlihat ketika nilai C_g kurang dari C_s . Ketika nilai C_g lebih besar dari C_s terlihat lonjakan nilai tegangan puncak pada ketiga fasanya.
6. Pada diagram bifurkasi dengan variasi *shunt capacitance*, kestabilan sistem terlihat ketika nilai C_s lebih besar dari C_g . Ketika nilai C_s lebih besar dari C_g terlihat lonjakan nilai tegangan puncak pada ketiga fasanya.
7. Berdasarkan hasil simulasi, tipe inti M5 menghasilkan respon feroresonansi 81,08%, M0H 89,19%, dan ZDKH 89,19% pada saat variasi *grading capacitance*. Pada kasus variasi shunt capacitance, Tipe inti M5 menghasilkan respon feroresonansi 78,38%, M0H 86,48%, dan ZDKH 83,78%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari tugas akhir ini untuk studi di masa yang akan datang adalah melakukan studi komparasi pendeteksian feroresonansi menggunakan transformasi wavelet pada transformator tiga fasa dengan inti yang berbeda. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan respon transient pada studi ini ketika variasi *grading capacitance* dengan variasi *shunt capacitance*. Selain itu dapat juga dianalisa respon gangguan feroresonansinya ketika kasus gangguannya berbeda-beda. Dengan adanya studi ini diharapkan menjadi acuan dalam perancangan transformator tiga fasa untuk meminimalisir terjadinya gangguan feroresonansi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Price, "A tutorial of Ferroresonance," Washington: IEEE, 2013, pp. 676–704.
- [2] H. K. Høidalen, A. Lotfi, S. Zirka, Y. Moroz, N. Chiesa, and B. A. Mork, "Benchmarking of hysteretic elements in topological transformer model," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 138, pp. 33–40, Sep. 2016.
- [3] I. M. Y. Negara, I. G. N. S. Hernanda, D. A. Asfani, D. Fahmi, Y. Afif, and M. Wahyudi, "Ferroresonance characteristics in unsymmetrical flux distribution of 150 KV three phase transformer," 2017, pp. 78–81.
- [4] K. Andarini, I. M. Y. Negara, and I. G. N. S. Hernanda, "Deteksi Ferroresonansi Pada Transformator Tiga Fasa Yang Tidak Simetri Terhadap Pengaruh Dari Pengubahan Kapasitansi," 2017, pp. 1–6.
- [5] F. A. M. Rizk and G. N. Trinh, *High voltage engineering*. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [6] J. H. Harlow, Ed., *Electric power transformer engineering*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004.
- [7] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.
- [8] P. Ferracci, "Ferroresonance," in *Cahier Techniques*, Group Schneider, 1998, pp. 1–28.
- [9] R. Zhang, H. Li, S. P. Ang, and Z. Wang, "Complexity of ferroresonance phenomena: sensitivity studies from a single-phase system to three-phase reality," 2010, pp. 172–175.
- [10] J. A. Corea-Araujo, F. Gonzalez-Molina, J. A. Martinez, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "Ferroresonance analysis using 3D bifurcation diagrams," 2013, pp. 1–5.
- [11] F. Ben Amar and R. Dhifaoui, "Study of the periodic ferroresonance in the electrical power networks by bifurcation diagrams," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 61–85, Jan. 2011.
- [12] J. S. P. Sinuraya, I. M. Y. Negara, and I. G. N. S. Hernanda, "Analisis Pengaruh Kapasitansi Terhadap Ferroresonansi Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Diagram Bifurkasi," 2017, pp. 1–8.

- [13] M Wahyudi, IMY Negara, DA Asfani, IGNS Hernanda, D Fahmi “Application of wavelet cumulative energy and artificial neural network for classification of ferroresonance signal during symmetrical and unsymmetrical switching of three-phases distribution transformer” International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2017
- [14] IGNS Hernanda, IMY Negara, A Soeprijanto, DA Asfani, M Wahyudi, Surya Dwi Kisdarmawan, Daniar Fahmi “Ferroresonance Signal Analysis with Wavelet Transform on 500 kV Transmission Lines Capacitive Voltage Transformers” Journal on Advanced Research in Electrical Engineering Vol.1(1), 2017
- [15] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, N Wijayanto, M Wahyudi, DA Asfani, Adi Soeprijanto “Ferroresonance Characteristics on Capacitive Voltage Transformer Under Lightning Impulse Voltage” International Review on Modelling and Simulations (IREMOS) vol.9(4), p.306-311, 2016
- [16] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, DA Asfani, SS Simamora “Study on damping reactor installation to address ferroresonance on incoming 20 kV GIS” International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2016

LAMPIRAN

Tabel respon tegangan tiga fasa variasi *grading capacitance*

Nilai kapasitansi (nF)	Fasa	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)
10	A	0,09	42,08	0,107	53,88	0,107	44,68
	B	0,095	39,90	0,117	53,75	0,101	44,76
	C	0,1	40,69	0,106	51,60	0,101	42,83
20	A	0,14	35,42	0,108	54,34	0,196	41,92
	B	0,12	42,36	0,095	54,22	0,245	42,33
	C	0,125	38,46	0,11	55,80	0,205	53,46
30	A	0,125	46,05	0,185	53,36	0,165	57,41
	B	0,13	48,61	0,181	43,92	0,15	55,52
	C	0,11	46,87	0,195	42,57	0,16	57,75
40	A	0,245	51,53	0,125	56,62	0,265	55,82
	B	0,235	52,11	0,112	59,83	0,275	54,86
	C	0,222	51,98	0,120	58,39	0,265	56,25
50	A	0,2	59,02	0,19	66,35	0,465	58,55
	B	0,212	62,72	0,195	63,86	0,49	58,41
	C	0,195	59,27	0,165	64,07	0,48	61,51
60	A	0,206	59,02	0,17	66,34	0,46	61,19
	B	0,21	58,95	0,19	62,42	0,489	63,23
	C	0,205	59,27	0,164	75,46	0,47	61,51
70	A	0,108	56,13	-	111,07	0,541	67,85
	B	0,115	54,21	-	113,92	0,59	69,12
	C	0,125	53,91	-	107,45	0,54	74,07
80	A	-	113,75	0,215	71,25	0,47	68,46
	B	-	99,45	0,195	73,06	0,495	67,72

Nilai kapasitansi (nF)	Fasa	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)
	C	-	105,53	0,21	70,1	0,466	76,56
90	A	0,09	64,42	0,785	65,96	0,17	65,93
	B	0,075	65,32	0,81	70,90	0,175	66,34
	C	0,1	65,54	0,82	68,77	0,187	67,59
100	A	0,385	67,90	-	100,9	-	102,73
	B	0,39	72,86	-	90,87	-	77,65
	C	0,402	72,6	-	89,05	-	105,87
110	A	-	103,39	0,352	71,19	-	105,88
	B	-	125,22	0,35	71,87	-	117,82
	C	-	118,95	0,34	71,65	-	121,26
120	A	-	103,23	0,25	67,86	-	109,29
	B	-	109,39	0,23	69,58	-	104,40
	C	-	97,51	0,24	71,08	-	97,32
130	A	-	97,80	-	114,79	-	131,48
	B	-	97,10	-	119,23	-	107,58
	C	-	102,29	-	99,91	-	126,59
140	A	-	105,89	-	115,89	-	115,82
	B	-	109,31	-	90,63	-	112,48
	C	-	96,84	-	103,75	-	120,5
150	A	-	107,58	-	119,03	-	125,12
	B	-	105,77	-	106,46	-	124,91
	C	-	88,16	-	118,31	-	126,58
160	A	-	117,02	-	140,52	-	120,95
	B	-	109,86	-	132,43	-	115,83
	C	-	123,63	-	127,37	-	109,86
170	A	-	111,96	-	131,17	-	134,81

Nilai kapasitansi (nF)	Fasa	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)
	B	-	126,75	-	120,25	-	108,86
	C	-	109,05	-	110,90	-	131,39
180	A	-	120,86	-	108,42	-	116,01
	B	-	106,28	-	123,50	-	121,04
	C	-	116,72	-	116,58	-	115,17
190	A	-	121,35	-	132,29	-	118,28
	B	-	121,94	-	123,22	-	122,87
	C	-	126,55	-	141,66	-	130,56
200	A	-	132,37	-	120,47	-	128,96
	B	-	116,18	-	132,76	-	110,66
	C	-	114,82	-	113,84	-	113,82

Tabel respon tegangan tiga fasa variasi *shunt capacitance*

Nilai kapasitansi (nF)	Fasa	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)
5	A	-	100,97	-	99,67	-	107,93
	B	-	109,48	-	97,73	-	105,14
	C	-	96,60	-	110,80	-	98,41
10	A	-	97,22	-	104,81	-	106,33
	B	-	118,78	-	107,86	-	116,77
	C	-	115,18	-	94,76	-	106,75
15	A	-	91,65	-	114,62	-	90,12

Nilai kapasitas nsi (nF)	Fas a	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Stead y state (t)	Tegang an puncak (kV)	Stead y state (t)	Tegang an puncak (kV)	Stead y state (t)	Tegang an puncak (kV)
	B	-	99,48	-	113,66	-	94,88
	C	-	107,47	-	98,77	-	94,35
20	A	-	91,79	-	106,33	-	73,77
	B	-	86,17	-	102,97	-	74,62
	C	-	85,73	-	97,51	-	86,73
25	A	-	86,39	-	106,37	-	95,60
	B	-	97,46	-	100,07	-	99,36
	C	-	95,72	-	99,58	-	103,39
30	A	-	94,99	0,155	60,98	0,57	55,19
	B	-	95,22	0,16	61,17	0,58	53,28
	C	-	88,46	0,159	67,42	0,59	52,35
35	A	0,470	55,92	0,465	64,51	0,125	65,64
	B	0,455	53,69	0,475	64,16	0,135	65,35
	C	0,444	59,96	0,455	64,35	0,155	63,49
40	A	0,136	61,26	0,39	61,23	0,245	64,29
	B	0,14	61,78	0,395	59,61	0,265	62,79
	C	0,145	66,45	0,40	59,45	0,283	60,59
45	A	0,246	60,84	-	79,09	0,225	58,63
	B	0,215	62,88	-	72,28	0,235	60,03
	C	0,228	57,41	-	76,33	0,220	61,28
50	A	0,2	59,02	0,19	66,35	0,465	58,55
	B	0,212	62,72	0,195	63,86	0,49	58,41
	C	0,195	59,27	0,165	64,07	0,48	61,51
55	A	0,145	56,28	0,345	60,04	0,425	60,42
	B	0,15	59,37	0,335	62,62	0,43	56,68
	C	0,155	57,35	0,32	64,45	0,415	59,43

Nilai kapasitansi (nF)	Fasa	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)	Steady state (t)	Tegangan puncak (kV)
60	A	0,325	54,15	0,485	59,20	0,910	55,31
	B	0,330	53,78	0,515	64,05	0,895	55,45
	C	0,340	54,77	0,520	61,22	0,900	57,19
65	A	0,13	60,96	0,465	58,65	0,13	67,44
	B	0,155	58,68	0,46	60,94	0,14	66,21
	C	0,16	60,21	0,455	63,09	0,13	64,71
70	A	0,32	56,75	0,35	53,63	0,365	59,34
	B	0,315	53,48	0,355	53,17	0,375	57,82
	C	0,325	54,45	0,36	57,53	0,38	58,66
75	A	0,165	54,96	-	95,61	-	87,33
	B	0,160	59,44	-	75,01	-	90,01
	C	0,165	55,65	-	92,34	-	89,65
80	A	0,170	55,19	0,285	63,16	0,65	60,14
	B	0,195	57,19	0,295	59,65	0,695	60,89
	C	0,180	59,89	0,305	62,06	0,685	64,86
85	A	0,210	53,29	0,285	54,92	-	77,02
	B	0,178	51,55	0,295	56,14	-	76,44
	C	0,205	54,95	0,305	56,15	-	72,45
90	A	0,66	59,81	0,312	60,92	0,205	56,11
	B	0,67	60,28	0,31	56,76	0,21	55,64
	C	0,64	62,43	0,30	56,15	0,195	58,62
95	A	0,25	55,39	0,325	58,97	-	84,22
	B	0,24	53,87	0,355	56,50	-	66,40
	C	0,24	52,95	0,325	60,29	-	79,31
100	A	0,25	54,94	0,205	56,23	0,43	62,04
	B	0,255	60,48	0,195	56,80	0,435	58,71

Nilai kapasita nsi (nF)	Fas a	Jenis Inti					
		M5		M0H		ZDKH	
		Stead y state (t)	Tegang an puncak (kV)	Stead y state (t)	Tegang an puncak (kV)	Stead y state (t)	Tegang an puncak (kV)
	C	0,245	57,35	0,225	58,51	0,420	59,36

List program diagram bifurkasi pada perangkat lunak MATLAB

```

clc;
clear;
hit = 0;
hasilx = [];
hasily = [];
for nn = 1 : 20, %jumlah data yang ada
    puncak = [];
    namafile = [sprintf('%02d',nn),'.mat'];
    %jumlah digit pada data yang ada
    load(namafile);
    puncak = findpeaks(vX0002a); %masukkan nama
    respon tegangan berdasarkan ATPDraw
    for ii = 1 : size(puncak,1)
        hit = hit + 1;
        hasilx(hit) = nn;
        hasily(hit) = puncak(ii);
    end
end
plot(hasilx,hasily,'.');

```

RIWAYAT HIDUP



Reno Hidayat, lahir di Jakarta pada tanggal 29 Mei 1996. Anak terakhir dari empat bersaudara. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan UKM Fotografi ITS. Selain itu, penulis juga aktif pada kegiatan organisasi di Departemen Teknik Elektro yaitu sebagai staff pengabdian masyarakat HIMATEKTRO Super dan panitia publikasi dan dokumentasi ELECTRA V. Penulis pernah berkesempatan menjadi salah satu *presenter* dalam seminar internasional ISITIA-RCEEE tahun 2017 di Hotel Bumi, Surabaya. Saat ini penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro ITS. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. SDN 01 Pondok Kelapa
2. SMPN 109 Jakarta
3. SMAN 61 Jakarta

Penulis dapat dihubungi pada email: renohidayat61@gmail.com.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---